

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Hodnocení řezných sil po aplikaci vysokorychlostního
frézování**

**The Evaluation of Cutting Forces after Application
of High-Speed Milling**

Student:

Bc. Karel Kaszperydes

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.

Ostrava 2018

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Karel Kaszperydes**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Téma: **Hodnocení řezných sil po aplikaci vysokorychlostního frézování**
The Evaluation of Cutting Forces after Application of High-Speed Milling
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Rešerše stávajícího stavu.
2. Návrh experimentální činnosti frézování.
3. Provedení experimentálního testování.
4. Zhodnocení dat a diskuze výsledků.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:


BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.
HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Brno : MM Publishing Praha, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2005. 651. p. ISBN 0-19-514206-3.
STEPHENSON, D. A.; AGAPIOU, J. S. *Metal cutting theory and practice*. New York : Marcel Dekker, Inc., 1997. ISBN 0-8247-9579-2.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018


doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry

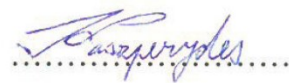



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 21. května 2018

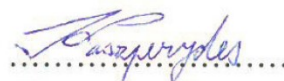


Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на ве́домі́, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 21. května 2018



Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce:

Karel Kaszperydes

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Bystřice nad Olší 999, 739 95

Poděkování:

Za cenné rady, příspěvky a odborné vedení bych chtěl poděkovat doc. Ing. et Ing. Mgr. Janě Petřů, Ph.D. Rovněž bych chtěl velmi poděkovat Ing. Tomáši Zlámalovi, Ph.D. za pomoc při realizaci experimentů vysokorychlostního frézování a při výpočtech silových poměrů při frézování. V neposlední řadě bych také chtěl poděkovat své rodině za příjemné zázemí, které mi při studiu vytvořila.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

KASZPERYDES, K. *Měření sil při vysokorychlostním frézování: Diplomová práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2018, 67 s. Vedoucí práce: Petrů, J.

Hlavní náplň diplomové práce se týká problematiky vysokorychlostního frézování a měření sil při tomto způsobu obrábění. Teoretická část práce je zaměřena na historii vysokorychlostního obrábění, jeho funkci, požadavky, principy a použití. Další část je věnována výsledkům experimentů obrábění stejných materiálů s podobnými řeznými parametry. Praktická část se zpočátku zabývá stručným rozbořem stroje, nástroje a potřebných komponentů k měření sil při vysokorychlostním obrábění. Experiment obrábění se týkal obrábění vzorků ze dvou odlišných ocelí, které byly frézovány pomocí různými řeznými parametry. V programu pro vyhodnocení jednotlivých silových poměrů byly určeny maximální hodnoty jednotlivých sil. Následně byly jednotlivé síly zpracovány a porovnány. Závěr diplomové práce se zabývá konečným vyhodnocením výsledku měření.

ANNOTATION OF THESIS

KASZPERYDES, K. *The Evaluation of Cutting Forces after Application of High-Speed Milling: Thesis,* Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2018, 67 p. Thesis head: Petrů, J.

The main topic of this diploma thesis deals with the issue of high-speed milling and measuring of forces during this machining process. The theoretical part is focused on the history of high speed machining, its function, requirements, principles and use. Second part is devoted to the results of experiments of machining same materials with similar cutting parameters. The practical part deals with a brief analysis of the machines, tools and components, which are necessary for the measurement of forces which are generated during high speed machining. Experiments were concerned machining of samples from two different steels, which have been milled with different cutting parameters. In the program for evaluation of each force ratio, the maximum value of each individual force were determined. Subsequently, these results were processed and compared. The conclusion of the diploma thesis deals with the final evaluation of the experimental measurement results.

Seznam použitých symbolů

Symbol	Popis	Jednotka
a'_t	tloušťka odcházející třísky při vysokorychlostní obr.	[mm]
v'_c	řezná rychlost při vysokorychlostním obrábění	[m · min ⁻¹]
v'_t	rychlost odchodu třísky z kontaktu řezu při HSC	[m · min ⁻¹]
A_5	tažnost	[%]
A_α	plocha hřbetu nástroje	[mm ²]
A_γ	plocha čela nástroje	[mm ²]
F_P	pasivní složka řezné síly	[N]
F_a	výsledná složka řezné síly	[N]
F_c	složka řezné síly	[N]
F_{cN}	normálová složka řezné síly	[N]
F_f	složka síly působící ve směru posuvu	[N]
F_{fN}	normálová složka síly ke směru posuvu	[N]
F_x	složka síly působící ve směru x	[N]
F_y	složka síly působící ve směru y	[N]
F_z	složka síly působící ve směru z	[N]
R_m	mez pevnosti	[MPa]
R_p	mez kluzu	[MPa]
a_p	hloubka řez	[mm]
a_t	tloušťka třísky	[mm]
f_z	posuv na zub	[mm]
k_{c1}	měrná řezná síla	[N · mm ⁻²]
m_c	materiálová konstanta	[–]
v_c	řezná rychlost	[m · min ⁻¹]
v_f	posuvová rychlost	[mm · min ⁻¹]
v_t	rychlost odchodu třísky z kontaktu řezu	[m · min ⁻¹]
z_n	počet zubů frézy	[–]
α_n	nástrojový úhel hřbetu v rovině normálové	[°]
γ_n	úhel čela nástroje v normálové rovině	[°]
δ'	úhel střižné roviny při vysokorychlostním obrábění	[°]
κ_r	úhel hlavního nastavení ostří	[°]

OMNO	oblast primární plastické deformace	[–]
APMX	maximální hloubka řezu frézy	[mm]
AZ	maximální hloubka vnoření frézy	[mm]
BS	délka hladícího břitu VBD	[mm]
CICTP1	počet řezných prvků frézovací hlavy	[–]
D	efektivní průměr záběru čelní frézy	[mm]
DC	minimální průměr řezu frézy	[mm]
DCON	spojovací průměr frézovací hlavy	[mm]
DCX	maximální průměr řezu frézy	[mm]
HB	tvrdost dle Brinella	[–]
HSC	high speed cutting	[–]
HSM	high speed machining	[–]
IC	průměr vepsané kružnice VBD	[mm]
KRINS	úhel hlavního břitu VBD	[°]
LE	účinná délka břitu VBD	[mm]
LF	funkční délka frézy	[mm]
N	nesousledná strategie frézování	[–]
RE	poloměr zaoblení rohů VBD	[mm]
S	sousledná strategie frézování	[–]
S	tloušťka VBD	[mm]
VBD	vyměnitelná břitová destička	[–]
a	vzdálenost středu frézy od 1. boku obrobku	[mm]
b	vzdálenost středu frézy od 2. boku obrobku	[mm]
l	frézovaná délka	[mm]
n	otáčky čelní frézy	[min ⁻¹]
α	úhel mezi středem a 1. bokem vystupujícího nástroje	[°]
β	úhel mezi středem a 2. bokem vystupujícího nástroje	[°]
δ	úhel kluzu	[°]
φ	úhel záběru čelní frézy v materiálu	[°]

OBSAH

Úvod	11
1 Vysokorychlostní obrábění	13
1.1 Historie vysokorychlostního obrábění	13
1.2 Porovnání vysokorychlostního a konvenčního obrábění	13
1.3 Jak funguje vysokorychlostní frézování HSM	14
1.4 Reálné použití vysokorychlostního obrábění	15
1.5 Požadavky na stroj a nástroj při vysokorychlostním obrábění	16
1.5.1 Požadavky na stroj	16
1.5.2 Požadavky na nástroj	18
2 Praktická část diplomové práce.....	20
2.1 Rešerše experimentální části práce	21
2.2 Frézované materiály při experimentu	21
2.2.1 Materiál č. 1 korozivzdorná ocel 1.4404	21
2.2.2 Materiál č. 2 ocel C 45 E	23
2.3 Obráběcí stroj – DMG MORI DMU 50	24
2.4 Obráběcí nástroj.....	26
2.4.1 Frézovací hlava	26
2.4.2 Břitová destička	26
2.5 Strategie sousledného a nesousledného frézování.....	27
2.5.1 Čelní nesousledné frézování	27
2.5.2 Čelní sousledné frézování	28
2.5.3 Průběh souslednosti a nesouslednosti při čelním frézování.....	28
2.6 Zařízení pro měření sil při frézování	30
2.6.1 Dynamometr KISTLER – typ 9129 AA	30
2.6.2 Zesilovač 5070 A	31
2.6.3 DAQ Box Kistler typ 5697A1	32
2.6.4 Program DynoWare verze 3.0.9.0	32

2.7	Schéma řezných podmínek	33
2.8	Řezné parametry prováděného experimentu	35
2.8.1	Příklad dopočítání řezných parametrů otáček a posuvové rychlosti.....	35
2.8.2	Všechny parametry experimentu	35
2.9	Označování vzorků oceli	36
2.10	Model zjednodušené situace obrábění při testu	37
2.11	Působení sil u dynamometru Kistler 9129 AA	37
2.12	Upnutí dynamometru a vzorku	38
3	Stanovení výpočtu řezných sil.....	40
3.1	Výpočet úhlu záběru φ	40
3.2	Teoretický výpočet výsledné řezné síly.....	41
3.3	Rozklady sil	43
3.4	Vzorový výpočet příkladu	45
4	Sjednocení a dopočítání hodnot sil pro obrábění oceli.....	48
4.1	Dopočítané hodnoty sil pro obrábění oceli C 45 E (ČSN 12 050.9)	48
4.1.1	Nesousledné frézování oceli C 45 E (ČSN 12 050.9).....	48
4.1.2	Sousledné frézování oceli C 45 E (ČSN 12 050.9).....	49
4.1.3	Porovnání sousledného a nesousledného frézování oceli C 45 E.....	50
4.2	Dopočítané hodnoty sil pro frézování oceli 316L (ČSN 17 349.4).....	52
4.2.1	Nesousledné frézování oceli 316L (ČSN 17 349.4)	52
4.2.2	Sousledné frézování oceli 316L (ČSN 17 349.4)	53
4.2.3	Porovnání sousledného a nesousledného frézování oceli 316L.....	54
4.3	Porovnání sil při frézování oceli 316L a C 45 E	56
4.4	Vliv jednotlivých sil na stroj	58
	Shrnutí výsledků	60
	Závěr	62
	Literatura	64

Úvod

Diplomová práce se zabývá vysokorychlostním frézováním, které je v praxi stále častěji používané. Jeho výhoda vychází především z úspory času při obrábění, které se využívá převážně při výrobě obrobků s dlouhými strojními časy. Tento druh obrábění se často používá k hrubování tvrdých i měkkých materiálů, ale i k dokončovacím operacím, kterými je možné docílit velmi dobré kvalitu povrchu. S technologií vysokorychlostního frézování je možné se setkat v energetice, automobilovém a leteckém průmyslu. Technologii vysokorychlostního obrábění lze využít nejen u zmiňovaného frézování, ale i u vrtání, vyvrtávání, soustružení a závitování.

Další důležitou součástí této diplomové práce je měření sil při tomto vysokorychlostním frézování. K tomuto účelu slouží dynamometr značky KISTLER, který funguje na principu piezoelektrického jevu krystalických materiálů.

V teoretické části diplomové práce je řešena historie, funkce, principy a použití vysokorychlostního obrábění. Dále se zaměřuje na požadavky stroje a nástroje při tomto způsobu frézování. Nakonec je v teoretické části práce zmíněný podobný experiment, ve kterém je obráběná stejná ocel, jaká je použita v mé praktické části diplomové práce. U podobného experimentu jsou uvedeny jeho řezné podmínky a dosažené výsledky naměřených sil.

První část experimentu diplomové práce se uskutečňovala v laboratoři Katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie na VŠB – Technické univerzitě Ostrava. Pro frézování byly přizpůsobeny dva vzorky z odlišných druhů oceli. Tyto vzorky byly upnuty na desku dynamometru, aby bylo možné měřit silové poměry při obrábění. Vzorky byly frézovány frézovací hlavou, ve které byla upnuta pouze jedna vyměnitelná břitová destička, aby bylo možné následně snadněji vyhodnotit jednotlivé řezné síly. Pro obrábění obou vzorků byly zvoleny tři řezné rychlosti 250, 350 a 450 m.min⁻¹. K frézování byla zvolena sousledná i nesousledné strategie v konstantní hloubce řezu 0,5 mm. U každé řezné rychlosti byly použity tři parametry posuvu na zub 0,1 mm, 0,5 mm a 1 mm.

Další část experimentu se týkala vyhodnocení řezných sil zaznamenaných pomocí dynamometru KISTLER do počítače. K vyhodnocení silových poměrů byl použit program Dynoware, ze kterého byly vyhodnoceny maximální složky řezných sil F_x , F_y a F_z . Z těchto sil byla dopočtena podle výpočtových vztahů výsledná řezná síla.

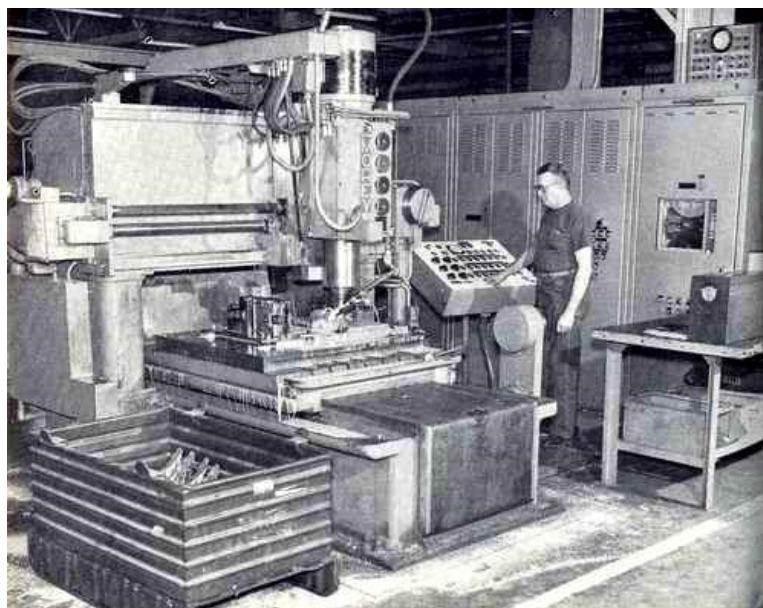
V závěru experimentu byly porovnány výsledné síly mezi sousledným a nesousledným frézováním u obou ocelí. Následně byly porovnány hodnoty silových poměrů mezi oběma materiály, aby bylo možné zjistit, jaký mají vliv vlastnosti materiálu na vysokorychlostní obrábění. Nakonec bude podle velikosti jednotlivých sil vyhodnoceno největší namáhání jednotlivých částí stroje.

1 Vysokorychlostní obrábění

Vysokorychlostní obrábění se podobá technologii, která se nazývá suché a tvrdé obrábění. Obě technologie mají stejný základ ve zvětšování řezné rychlosti a teploty třísky. Zákonitost při obrábění je taková, že si materiál nástroje udrží v řezném prostředí oproti obráběnému materiálu mnohem vyšší tvrdost¹.

1.1 Historie vysokorychlostního obrábění

Tento způsob frézování není žádnou novinkou. Je známý již od roku 1931, kdy se touto problematikou zabýval formou výzkumu německý vědec Carl Salomon. Odhalil fakt, že při zvyšování řezné rychlosti u klasického třískového obrábění dojde teplota k maximální hodnotě a po dalším zvýšení řezné rychlosti znovu klesne pod kritickou hodnotu řezného materiálu. V dalších letech se vysokorychlostnímu obrábění věnovalo velké množství vědců. Kupříkladu se v roce 1966 touto problematikou zabýval vědec Kronenberg, který došel k teorii, že řezná rychlost na počátku roste a poté výrazně klesá. Další vědci, kteří se zabývali opotřebením nástrojů, zjistili, že při vysokorychlostním obrábění dochází ke zvýšenému opotřebení¹.



Obr. 1 Historická CNC frézka z roku 1962 řízená magnetickými pásky²

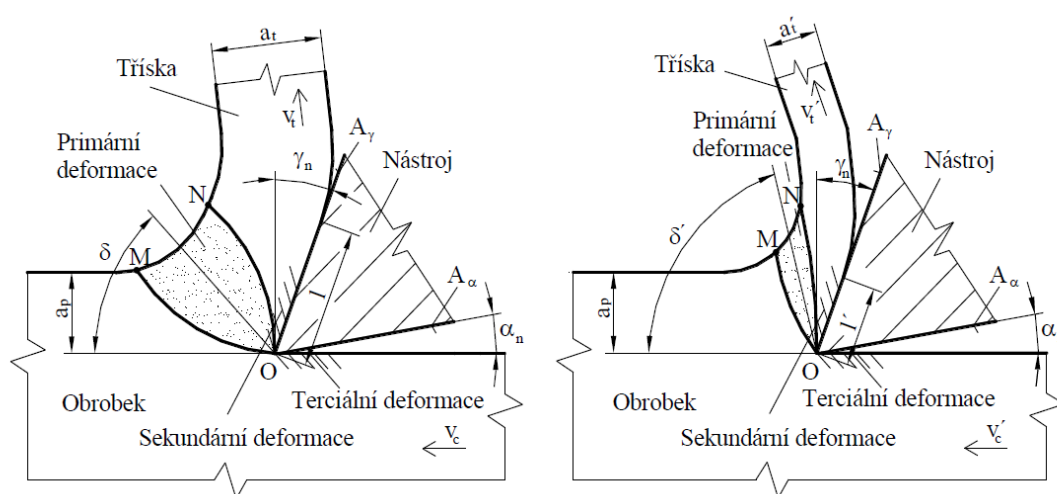
1.2 Porovnání vysokorychlostního a konvenčního obrábění

U konvenčního obrábění dochází ve střižné rovině ke zpevnění, které následně vede k ztvrdnutí třísky oproti původnímu materiálu. Naopak se u vysokorychlostního obrábění pomocí tepelně odolného a tvrdého nástrojového materiálu tvoří tříska, jejíž teplota se přibližuje tavné teplotě obráběného materiálu a dochází k prudkým mechanickým,

chemickým, metalurgickým změnám vlastností vzniklé třísky. Tato prudká změna teploty je kladným faktorem a zdrojem efektu vysokorychlostního obrábění ³.

Porovnáme-li vysokorychlostní a konvenční obrábění, které je možno vidět na obr. 2, najdeme určité rozdíly:

- Průřez obráběné třísky
- Úsek kontaktní zóny mezi nástrojem a obrobkem
- Rychlost řezání
- Rychlost opuštění třísky z místa obrábění
- Úhel střižné roviny ⁴



Obr. 2 Porovnání konvenčního a vysokorychlostního obrábění ⁴

Chlazení není u vysokorychlostního obrábění žádoucí, protože by bránilo popisovanému efektu. Obráběná třísky zrudne, změkne a sníží svou sílu přítlaču na nástrojové čelo. Vysokou řeznou rychlostí se snižuje doba kontaktu nástroje s třískou. Přenos tepla téměř nepřechází do nástroje, ale většina tepla odchází obrobemou třískou. Jsou kladeny vysoké požadavky na nástroj: důležitá je kvalita řezné hrany, opracovaný povlak, který má dobrou odolnost vůči abrazivnímu, difuznímu opotřebení a kromě toho tvoří dobrou tepelnou izolaci. ³

1.3 Jak funguje vysokorychlostní frézování HSM

HSM je technologie vysokorychlostního frézování, kde dochází k většímu úběru obráběného materiálu vlivem zvětšené řezné rychlosti. Zde je použita řezná rychlost jako kompenzační faktor převážně pro malé hloubky řezu (malý úhel záběru = nízké řezné teploty). Správnou řeznou rychlostí zajišťujeme, že teplota řezu leží uvnitř správného

pracovního místa. Vysokorychlostní frézování používáme především pro velké úběry měkkých materiálů nebo pro dokončování finálních ploch tvrdých materiálů ⁵.

Technologie vysokorychlostního frézování se v průběhu posledních několika let ukázala jako vysoce spolehlivá. Její přínos spočívá především v ekonomické oblasti – zvyšuje produktivitu a snižuje náklady. HSM však zároveň nese určitá omezení. Tím největším omezením jsou vysoké požadavky na kvalitu obráběcího stroje, který by měl mít vysoký řezný výkon, být dostatečně tuhý, přesný a stabilní. Z tohoto důvodu je důležité zvážit, zda se investice do tak nákladného stroje pro využití vysokorychlostní strategie vyplatí ⁵.

1.4 Reálné použití vysokorychlostního obrábění

Pro výrobu je vysokorychlostní obrábění použitelné především pro obrobky, u kterých při výrobě převažují dlouhé strojní časy a vedlejší časy jsou téměř nepodstatné. Následně uvádím několik případů využití vysokorychlostního obrábění v praxi:

- Obrábění součástí náchylných k deformacím. To mohou být součásti z křehkých materiálů nebo součásti s tenkými stěnami.
- Obrábění součástí z materiálů choulostivých na teplo, které vzniká v průběhu obrábění.
- Hrubování součástí z hliníku a jeho slitin používaných především pro letecký a automobilový průmysl.
- Obrábění titanu a jeho slitin pro energetický a letecký průmysl.
- Hrubování tvrdých materiálů např. litiny (až 60 HRC).
- Dokončovací obrábění povrchů, zdokonalení drah nástroje pro dosažení velké jakosti povrchu.
- Dokončovací operace jako jsou: ruční dokončování, broušení a leštění.
- Obrábění složitých tvarů dutin zápustek, nástrojů pro lisování a forem z houževnatých, pevných a tvrdých materiálů (oceli, kalené oceli a měď) ⁶.



Obr. 3 Ukázka vysokorychlostního obrábění kalené litiny ⁷

Technologie vysokorychlostního obrábění se používá nejen u mnou zmiňovaného frézování, ale rovněž u soustružení, vrtání, vyvrtávání, broušení, závitování atd. ⁶

Obrábění tvrdých materiálů

Jak již bylo zmíněno, vysokorychlostní frézování je možné použít pro obrábění velmi tvrdých materiálů. Za tvrdé materiály můžeme považovat ty, které jsou tepelně zušlechťeny a jejichž tvrdost je většinou okolo 45–60 HRC. V minulosti se takto tvrdé materiály obráběly velmi nízkými reznými rychlostmi nebo často broušením. V současné době, kdy máme k dispozici moderní rezné materiály, např. některé typy keramiky, kubický nitrid boru apod., můžeme obrábět i ty nejtvrďší obrobky pomocí konvenčních technologií obrábění. Pro obrábění tohoto typu je potřebná úplná převaha fyzikálních vlastností materiálu nástroje nad materiálem obrobku ⁶.

1.5 Požadavky na stroj a nástroj při vysokorychlostním obrábění

Při vysokorychlostním obrábění je nutné dodržovat určité zásady při návrhu stroje, nástrojů, upínek a nejrůznějších druhů přípravků. Musí být dodržena perfektní tuhost soustavy stroj, nástroj a obrobek, aby nedocházelo k nežádoucím vibracím a chvění. Samotný nástroj musí mít požadovanou geometrii, být vyroben z vhodného nástrojového materiálu a jeho povrch by měl chránit kvalitní povlak.

1.5.1 Požadavky na stroj

Stroje pro konvenční obrábění musely projít velkými generačními změnami, aby dosáhly potřebných požadavků pro vysokorychlostní obrábění. Stroje pro vysokorychlostní obrábění disponují mnohem vyššími výkony, výrobností a rovněž i různorodostí

a přizpůsobivosti ve výrobním procesu. Tyto stroje většinou pracují ve výrobě s vícesměnným nebo nepřetržitým provozem, kde jsou spojeny s manipulátory a velkokapacitními zásobníky obráběcích nástrojů a obrobků. Mezi nejmodernější druhy obráběcích strojů pro frézování patří pěti a víceosá obráběcí centra viz obrázek 4 ⁸.



Obr. 4 Jedno z nejmodernějších obráběcích center od firmy DMG MORI

U HSC strojů nejsou vždy nejdůležitějšími faktory pouze parametry výchozích otáček, výkonu a posuvu, ale rovněž celkové sladení stroje se softwarem, obsluhou a nástrojovým osazením stroje pro danou technologickou činnost. Pro vysokorychlostní stroje je podstatné, aby došlo ke zvýšení řezné rychlosti a řezného výkonu v porovnání se stejným případem u konvenčního obrábění ⁸.

Při vysokorychlostním obrábění dochází ke zvýšené produkci třísek. V praxi může být u vysokorychlostního obrábění objem třísek 2x až 3x větší než u konvenčního obrábění. Z tohoto důvodu jsou u HSC obráběcích strojů kladeny vysoké nároky na konstrukční řešení zařízení pro odvod teplých třísek od obrobku, z prostoru pracoviště a z obráběcího stroje vůbec ⁸.

Velkými konstrukčními změnami u vysokorychlostních obráběcích strojů prošla vřetena, která jsou vysokovýkonová a vysokootáčková s integrovanými elektromotory. Druh tohoto náhonu je zvolen především kvůli eliminaci chvění, které vzniká při procesu vysokorychlostního obrábění. Vřetena s integrovanými elektromotory výrazně zkracují délku celého vřetene, a tím dochází ke snížení možných zdrojů vyzařujících teplo (řemenové, řetězové převody, ozubená kola atd.) ⁸

1.5.2 Požadavky na nástroj

Kvůli náročnějším řezným podmínkám a různorodosti obráběných materiálů je ve vysokorychlostní obrábění zapotřebí uváženě volit druh a složení materiálu nástroje:

- Kubický nitrid bóru – kalené oceli
- Cermety – nástrojové oceli
- Polykrystalický diamant – obrábění neželezných kovů
- Mikrozrnné slinuté karbidy – časté pro obrábění běžnějších materiálů ⁸

Pro HSC technologie obrábění bylo vytvořeno velké množství nástrojů od mnoha světových výrobců. Hlavní světoví výrobci řezných nástrojů a jeho příslušenství jsou: Sandvik, Iscar, Walter, Coroman, Kennametal – Hertel a mnoho dalších, kteří se podílejí nejen na výrobě, ale i na vývoji a inovacích nových a stávajících nástrojů ⁸.



Obr. 5 VBD značky Sandvik Cormant třídy CC6190 určené pro vysokorychlostní obrábění litin ⁹

Hrany řezných nástrojů jsou většinou vytvářeny ve formě vyměnitelných břitových destiček, viz obrázek 5, které se pro potřebné frézovací operace upínají do těles nástrojů (frézovacích hlav) nejrozmanitějších rozměrů a tvarů. Vyměnitelné břitové destičky mají většinou univerzální tvar, aby je bylo možné použít k nejrozličnějším obráběcím operacím. Naopak tělesa nástrojů mají často složitý tvar, který tvoří různě orientované plochy určené k upevnění vyměnitelných břitových destiček ⁸.

Další, ale méně častou variantou nástrojů pro vysokorychlostní obrábění, jsou monolitní varianty z tvrdokovu.



Obr. 6 Frézy Seco s keramickými vyměnitelnými břitovými destičkami pro vysokorychlostní
obrábění vysoce legovaných slitin na bázi niklu ¹⁰

2 Praktická část diplomové práce

Při psaní diplomové práce jsem na internetových stránkách našel několik experimentů, které se zabývaly měřením sil při frézování vzorku z nejrůznějších druhů ocelí. Pouze pár se jich zabývalo právě čelním frézováním ocelí ze stejného nebo podobného materiálu, které jsem použil ve své práci.

Jednalo se o diplomovou práci, kde student řešil silové zatížení nástrojů při frézování. Účel této práce byl v porovnání řezných sil při obrábění jedním nástrojem s konstantními řeznými parametry obrábění, ale různým vyosením nástroje.

Byla použita frézovací hlava značky Pramet s označením 80A06R-S45OD06D, do které byly upnuty vyměnitelné břitové destičky s označením ODMT 0605ZZN. Efektivní průměr záběru frézy při hloubce záběru $a_p = 1$ mm činil 80 mm. Frézovací hlavu je možné osadit šesti břitovými destičkami, ale byla uchycena pouze jedna, aby bylo možné lépe vyhodnocovat jednotlivé silové poměry při obrábění (stejně jako u experimentu této diplomové práce). Obráběným materiálem byla ocel C 45 E ¹¹.

Řezné podmínky testu:

Tab. 1 Řezných podmínek experimentu podobného druhu ¹¹

Parametr	Značení a jednotka	Hodnota
Řezná rychlost	v_c [m.min ⁻¹]	226
Posuv na zub	f_z [mm]	0,89
Otáčky	n [min ⁻¹]	900
Hloubka řezu	a_p [mm]	1
Posuvová rychlost	v_f [mm.min ⁻¹]	80

Dosažené výsledky experimentu:

Jelikož se v práci zabývali měřením sil při různé excentricitě nástroje vůči obrobku, volil jsem takovou excentricitu, aby se úhel záběru ϕ přiblížil co nejblíže tomu mému. Jejich úhel záběru čelní frézy ϕ činil 117,5° ¹¹.

Tab. 2 Dosažené hodnoty experimentu podobného druhu ¹¹

Excentricita osy	Vypočtená síly	Změřená síla
[mm]	[N]	[N]
11	276,6	382

2.1 Rešerše experimentální části práce

Praktická část diplomové práce se týká vysokorychlostního frézování vzorků dvou různých ocelí. Experiment se uskutečnil v laboratoři Katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie. Samotný experiment obrábění byl proveden na pěti-osém frézovacím centru DMG MORI DMU 50. Pro frézování byla zvolena jak frézovací hlava, tak vyměnitelné břitové destičky značky SANDVIK. Frézovací hlavu je možné osadit pěti vyměnitelnými břitovými destičkami, ale byla upnuta pouze jedna, aby bylo možné následně snadněji vyhodnotit jednotlivé složky řezných sil. Frézování probíhalo souslednou i nesouslednou strategií při konstantní hloubce řezu 0,5 mm. Pro obrábění byly zvoleny tři řezné rychlosti 250, 350 a 450 m.min⁻¹. Ke každé řezné rychlosti byly přiřazeny tři posuvy na zub 0,1 mm, 0,5 mm a 1 mm. Při obrábění byly vzorky upevněny na dynamometru, který zaznamenával síly v osách x, y a z do přenosného počítače.

2.2 Frézované materiály při experimentu

Pro experiment byly vybrány dvě v praxi často používané oceli, které mají odlišné fyzikální vlastnosti. Jedná se o korozivzdornou ocel 1.4404 (ČSN 17 349.4) a nízkolegovaná ocel C 45 E (ČSN 12 050.9).

2.2.1 Materiál č. 1 korozivzdorná ocel 1.4404

Tab. 3 Označení materiálu – oceli č. 1 ¹²

Označení materiálu č. 1			
ČSN 17 349.4	AISI 316L	X2CrNiMo 17-12-2	1.4404

Pro experiment byl zvolen jako první obráběný materiál austenitická, nestabilizovaná, molybdenová, nízkouhlíková, korozivzdorná ocel ČSN 17 349.4. Ocel je nekalitelná, nemagnetická. Má tendenci ke zpevňování u tváření nebo u třískového obrábění (špatně zvolené řezné podmínky). Odolává mezikrystalové plošné korozi, a to především proti kyselině sírové a fosforečné. Je velice dobře svařitelná všemi možnými způsoby a rovněž i dobře obrobitelná. Pro své dobré vlastnosti má ocel široké využití i v agresivním prostředí např. průmyslová přímořská prostředí. ¹²

Dodává se ve formě:

- tyčí plochých a kruhových,
- tyčí 4 hraných, 6 hraných

- plechů,
- trubek bezešvých i svařovaných,
- profilů L,
- jaklů.¹²

Použití pro:

- tlakové nádoby,
- svařované konstrukce v agresivním prostředí průmyslového typu,
- nádoby v chemickém, farmaceutickém, potravinářském, textilním průmyslu (kde je potřeba odolávat kyselinám, nebo k docílení vysoké čistoty produktu),
- součástí, kde je zapotřebí dosáhnout vysokého lesku po operaci leštění¹³.

Tab. 4 Chemické složení materiálu oceli 1.4404¹³

Chemické složení 1.4404	Prvek	Množství v hm. %
	Cr	16,5–18,5
	Si	≤1,0
	Mn	≤2,0
	S	≤0,015
	P	≤0,045
	C	≤0,03
	Ni	10-13
	Mo	2-2,5
	N	≤0,11

Tab. 5 Mechanické parametry korozivzdorné oceli 1.4404¹³

Minimální mechanické parametry			
Mez pevnosti	Mez kluzu	Tažnost	Tvrdost dle Brinela
R _m [MPa]	R _{p 0,2} [MPa]	A ₅ [%]	HB
500-700	200	40	215

Austenitická korozivzdorná ocel 1.4404 slouží jako etalon při určování obrobiteľnosti korozivzdorných ocelí. Tato ocel je nekalitelná, nemagnetická a má sklon ke zpevňování

zastudena. Materiál má dobrou odolnost proti mezikrystalické korozi, ta nehrozí ani při svařování. Materiál je relativně dobře obrobitelný a je vhodný k tváření za studena. ¹²

2.2.2 Materiál č. 2 ocel C 45 E

Tab. 6 Označení materiálu – oceli č. 2 ¹⁴

Označení materiálu č. 2		
ČSN 12 050.9	C 45 E	1.1191

Jako druhý obráběný materiál byla ocel s označením ČSN 12 050.9. Je to velice často používaná nelegovaná ocel k výrobě méně namáhaných strojírenských součástí v zušlechtěném stavu nebo stavu normalizačního žíhání. K dosažení požadovaných mechanických vlastností i houževnatosti se používá kalení a popouštění. Při výrobě tvarově složitých součástí se proti vzniku trhlin používá kalení do oleje. Dále je možno povrch této oceli kalit indukci či plamenem. ¹⁴

Dodává se ve formě:

- válcované/ tažené tyče kruhové,
- válcované tyče ploché,
- válcované tyče ploché,
- válcované/ tažené tyče čtvercové,
- tyče šestihranné ¹⁵.

Použití pro:

- hřídele – těžebních strojů, elektromotorů, turbokompresory, karusely,
- větší ozubená kola, rotory šroubových kompresorů, šneky, ozubené věnce, pístnice, ojnice, čepy, plunžry, vřetena, písty kompresorů, dopravní vlečky,
- šrouby, páky, lamely spojek, lůžka, držáky, kolíky, spojovací součásti, zarážky, vahadla, západky, posouvací vidlice, kované svorníky tlakových nádob, frézovací trny a vrtací tyče ¹⁵.

Tab. 7 Chemické složení materiálu oceli 1.1191 ¹⁴

Chemické složení 1.1191	Prvek	Množství v hm. %
	C	0,42 – 0,50
	Si	≤0,40
	Mn	0,50 – 0,80
	S	≤0,035
	P	≤0,030
	Cr	≤0,40
	Ni	≤0,40
	Mo	≤0,10

Tab. 8 Mechanické parametry oceli 1.1191 ¹⁴

Minimální mechanické parametry			
Mez pevnosti	Mez kluzu	Tažnost	Tvrдость dle Brinela
R _m [MPa]	R _{p 0,2} [MPa]	A ₅ [%]	HB
650-800	min. 281	16	198

2.3 Obráběcí stroj – DMG MORI DMU 50

Pro obrábění tohoto experimentu bylo zvoleno univerzální pěti-osé frézovací centrum DMU 50 od výrobce DMG MORI. Toto obráběcí centrum se nachází v laboratoři katedry, kde byl celý experiment prováděn. Toto frézovací CNC centrum se vyznačuje inovativními technologiemi konstrukce. Zařízení disponuje vysokými kvalitami, jako jsou digitální pohony ve všech osách, rychlý průchod a vysokootáčkové motorové vřeteno.



Obr. 7 Obráběcí centrum DMU 50 od společnosti DMG MORI ¹⁶

Další rozměr a flexibilitu tvoří otočný stůl, který celému zařízení dodává další dvě osy obrábění. Integrovaný otočný stůl je dimenzován na relativně těžké obrobky, které může polohovat s maximální přesností kvůli velkým ložiskům v obou rotačních osách. CNC obráběcí centrum zajišťuje vynikající přístup do pracovního prostoru, velmi dobrý odvod třísek z obráběcího prostoru a velkou pracovní plochu vůči rozměrům celého stroje. DMU 50 pracuje na systému od německé firmy HAIDENHAIN s označením iTNC 530 HSCI. Tento systém má postprocesor sladěný s počítačovým softwarem Mastercam ¹⁷.

Tab. 9 Technické parametry frézovacího centra DMU 50 ¹⁷

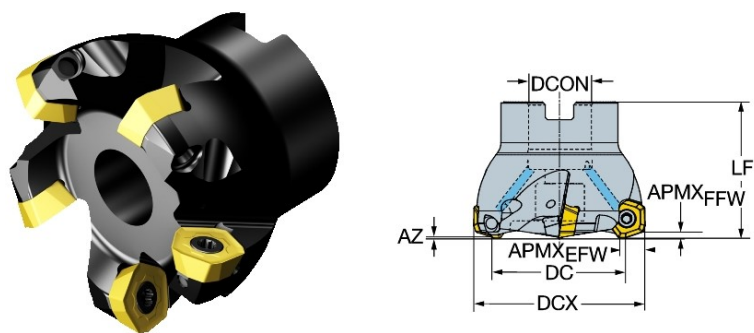
Technický parametr	Hodnota
Rozsah otáček vřetene	20-18 000 [min ⁻¹]
Rozsah posuvu v osách X/Y/Z	500/450/400 [mm]
Rychloposuv	24 000 [mm.min ⁻¹]
Hmotnost stroje	4 480 [kg]
Maximální hmotnost obráběné součásti	300 [kg]
Výkon vřetene (100 % / 40 % zatíženost)	25/35 [kW]
Točivý moment vřetene (100 % / 40 % zatíženost)	87/130 [N.m]
Nástrojové opnutí	HSK-A63
Množství nástrojů v zásobníku	16/30 [ks]
Velikost pracovního stolu	630x500 [mm]

2.4 Obráběcí nástroj

Pro obrábění byla zvolena robustní frézovací hlava, do které je možné umístit pět vyměnitelných břitových destiček. U experimentu byla upnuta pouze jedna břitová destička, aby nám ostatní nezkreslovaly jednotlivé složky sil.

2.4.1 Frézovací hlava

Při experimentu vysokorychlostního frézování obou materiálů byla použita čelní frézovací hlava od výrobce SANDVIK s označení 419-052Q22-14H.



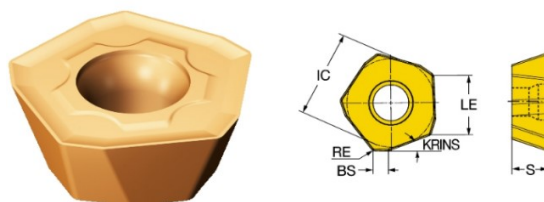
Obr. 8 Frézovací hlava Sandvik 419-052Q22-14H ¹⁸

Tab. 10 Parametry frézovací hlavy Sandvik 419-052Q22-14H ¹⁸

Parametr	Hodnota
DCX	52 mm
DC	37,4 mm
APMX EFW	8 mm
AZ	2 mm
APMX FFW	2 mm
LF	45 mm
DCON	22 mm
CICTP1-počet řezných prvků	5 -

2.4.2 Břitová destička

Do frézovací hlavy byla vložena břitová destička značky SANDVIK s označením 419R-1405E-MM 1030.



Obr. 9 Vyměnitelná břitová destička Sandvik 419R-1405E-MM 1030 ¹⁸

Tab. 11 Technické parametry VBD Sandvik 419R-1405E-MM 1030 ¹⁸

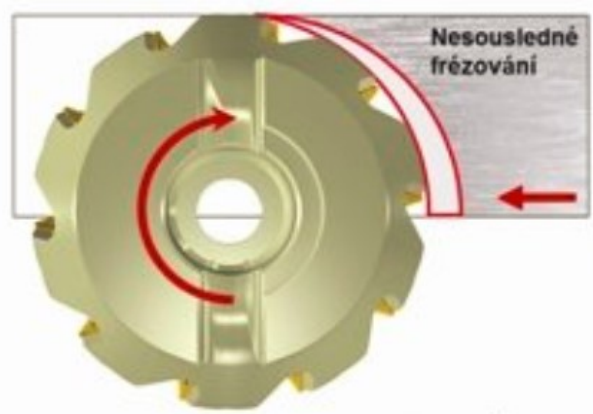
Parametr	Hodnota
IC	13,5 mm
LE	9 mm
RE	0,8 mm
BS	2 mm
KRINS	19 °
S	5,47 mm
Počet možných pootočení destičky	5

2.5 Strategie sousledného a nesousledného frézování

Sousledné a nesousledné frézování bylo použito při praktické části testu vysokorychlostního obrábění. Dva druhy oceli se frézovaly třemi různými reznými rychlostmi a také třemi různými posuvy na zub. Frézování obou ocelí při jednotlivých rezných parametrech probíhalo jak souslednou, tak nesouslednou strategií.

2.5.1 Čelní nesousledné frézování

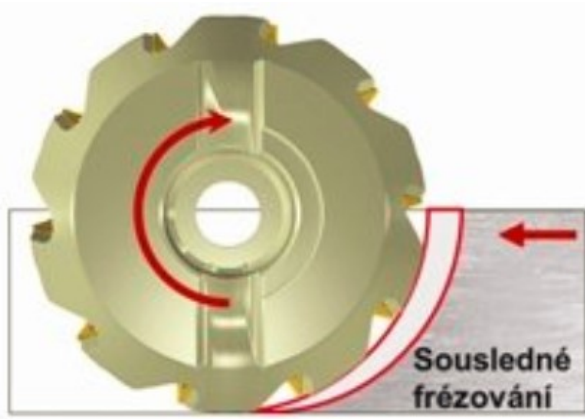
Nesousledné frézování je strategie obrábění, kdy se fréza otáčí proti směru posuvu obrobku. U nesousledného frézování se průřez třísky zvětšuje od minimální k maximální hodnotě. Zpočátku obrábění dochází vlivem pružných deformací obráběného materiálu ke skluzu břitu po obrobené ploše, než dojde k minimální tloušťce třísky 0,01 až 0,03 mm. Tento jev zapříčiňuje nadměrné opotřebení břitu nástroje, jeho kratší životnost, vyšší vzniklé teploty, větší tvorbu vibrací, horší kvalitu povrchu, a to především u materiálu s deformačním zpevněním ¹⁹.



Obr. 10 Nesousledná strategie čelního frézování ¹⁹

2.5.2 Čelní sousledné frézování

Při sousledném frézování se fréza otáčí ve stejném směru s posuvem stroje. U sousledné strategie frézování se průřez třísky zmenšuje od maximální po minimální hodnotu na obrobené ploše, která je oproti nesousledné strategii frézování kvalitnější. Zde vznikají silové rázy, které je možné aspoň částečně eliminovat použitím frézy se šikmými zuby. Břit nástroje nesklouzává po obrobené ploše, nedochází k nadměrnému opotřebení břitu, nástroj se tolik nezahřívá. Je možné obrábět tvrdší materiály než nesousledným frézováním a volit jak vyšší řeznou rychlost, tak vyšší posuv. Sousledná strategie frézování je nárazovější. Vyžaduje vymezení vůlí ve vodicích plochách a mechanismech posuvu, aby vzniklé vibrace nezhoršily kvalitu obrobené plochy, popřípadě nezničily stroj ¹⁹.

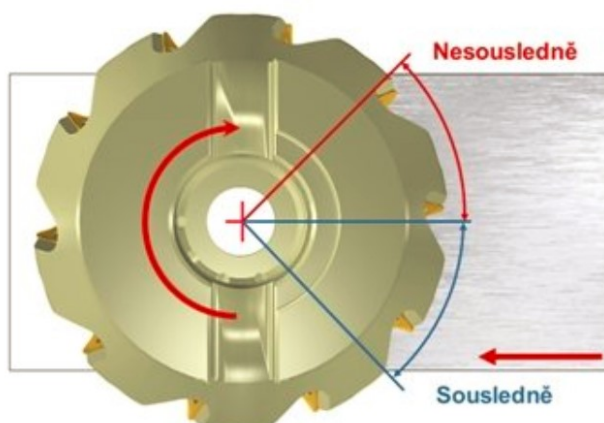


Obr. 11 Sousledná strategie čelního frézování ¹⁹

2.5.3 Průběh souslednosti a nesouslednosti při čelním frézování

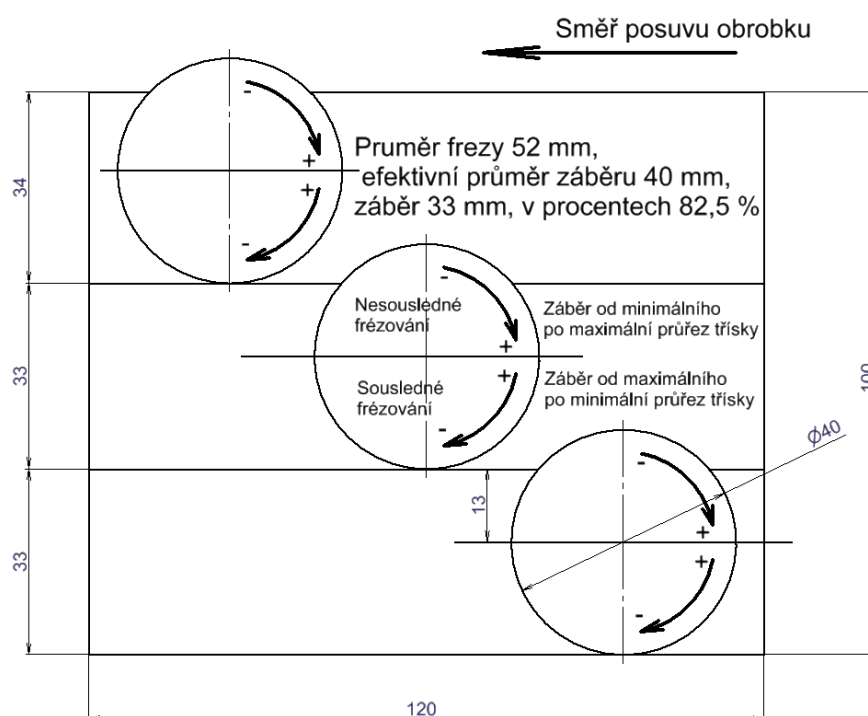
U čelního frézování není rozklad na souslednou a nesouslednou strategii frézování tak jednoznačný jako u válcového frézování. V jedné fázi obrábění dochází k frézování nesouslednému, fréza se otáčí v opačném směru proti posuvu obrobku (fáze označená

červenou barvou) a v druhé fázi dochází k souslednému frézování a fréza se otáčí ve stejném směru s posuvem obrobku (fáze označená modrou barvou). Viz obrázek 12 ¹⁹.



Obr. 12 Rozdělení nesousledného a sousledného obrábění při čelním frézování ¹⁹

Dalším poměrně důležitým kritériem je množství zubů současně zabírajících do materiálu. V případě našeho testu je fréza pro 5 břitových destiček, ale byla osazena pouze jedinou, aby bylo možné lépe vyhodnocovat průběh sil pomocí dynamometru. Kvůli jedné břitové destičce budou rázy větší, povrch méně kvalitní, ale zaznamenané síly při obrábění budou vypovídat přesnějšími hodnotami.



Obr. 13 Schéma průběhu sousledného a nesousledného frézování při experimentu

2.6 Zařízení pro měření sil při frézování

Sestavení dynamometru obsahuje tyto komponenty:

- Dynamometr
- Zesilovač
- DAQ box
- Propojovací kabely
- PC s programem Dynoware

2.6.1 Dynamometr KISTLER – typ 9129 AA

Pro měření sil při frézování byl použit tříložkový stacionární dynamometr s označením 9129 AA od firmy Kistler Eastern Europe s.r.o. Tento dynamometr slouží k určení záznamu sil a jejich poměrů při obrábění. Toto zařízení nám pomáhá zjišťovat mechanickou zátěž na celou soustavu (od stroje až po obrobek) a zajišťovat naměřená data, která jsou užitečná s ohledem na dynamickou stálost řezu a jeho tuhost²⁰.



Obr. 14 Dynamometr Kistler 9129 AA²⁰

Dynamometr se skládá ze čtyř tříkomponentních snímačů síly, které jsou umístěny mezi horním ocelovým krytem desky a dvěma bočními základovými deskami. Díky speciální montáži snímačů dochází k jejich minimálnímu ovlivnění teplotou. Silové senzory obsahují tři krystalové disky, z nichž je jeden citlivý na tlakovou sílu v ose z a další dva na smykové síly v ose x a y. Krystalové desky produkují při mechanickém zatížení elektrický náboj kvůli tzv. piezoelektrickému jevu daných krystalických materiálů. Nejčastěji používané materiály k výrobě krystalových desek jsou křemeny, seignettovy soli a materiál na bázi titaničitanu barnatého²⁰.

Technical drawing of the KISTLER 1677A/1687B force transducer. The drawing includes a side view at the top showing dimensions like $\text{Ø}11$, $\text{M}6 \times 8/12$, and the KISTLER logo. Below is a top view showing a 5x5 grid of mounting holes with dimensions 150x107mm. A cable connection is shown on the right with a minimum bend radius of R55. The text "Cable Type 1677A... Type 1687B..." is present at the bottom right.

Výstupy ze čtyř vestavěných silových snímačů jsou spojeny s 9 pólovou zásuvkou. Je rovněž možné měřit vícesložkovou silou – moment. Zařízení je z korozivzdorného materiálu a je chráněno proti vniknutí chladicí emulze ²⁰.

Tento zesilovač je k dispozici jako 4 nebo 8 kanálová verze. Ve spojení s vícesložkovými dynamometry slouží k výpočtu tří složek výsledného vektoru momentu a výsledných sil v reálném čase. Potřebné hodnoty pro specifikaci dynamometru lze nastavit přímo na zesilovači. Všechny důležité hodnoty jako jsou počáteční, okamžité, minimální a maximální hodnoty kanálů se zobrazují na grafickém displeji z tekutých krystalů. Jednotlivé kanály mohou být přepínány na displeji dle potřeby ²¹.



Obr. 16 Zesilovač signálu 5070 A ²¹

2.6.3 *DAQ Box Kistler typ 5697A1*

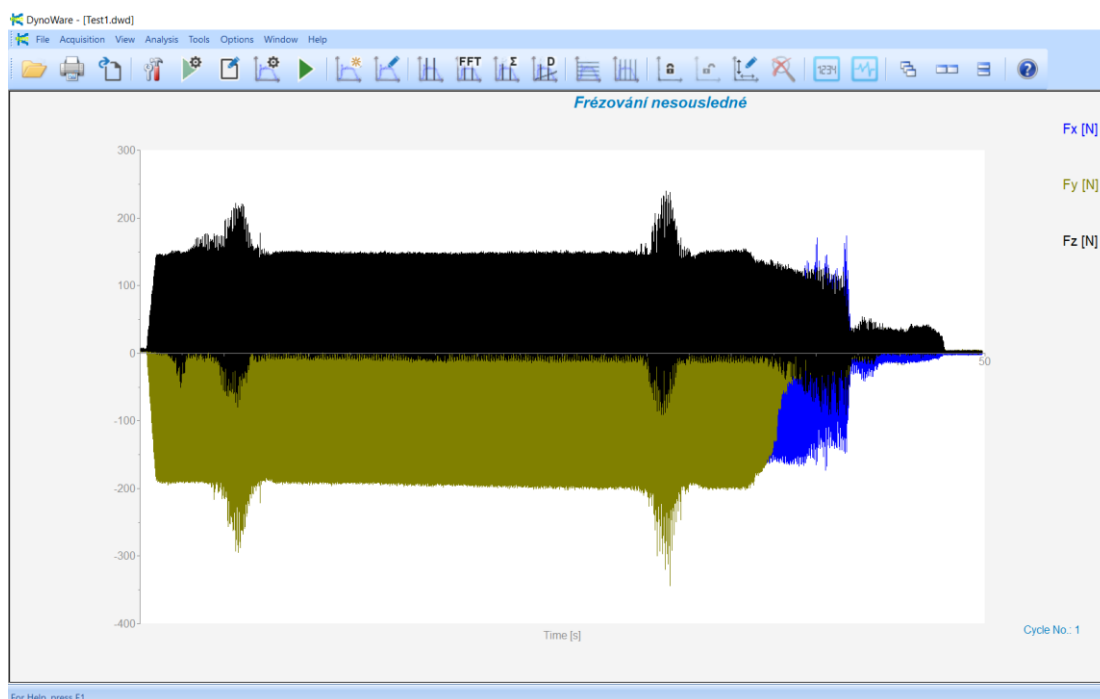
Tento box obsahuje klíč HASP, který má licenci pro funkci programu. Je vybaven 16 bitovým převodníkem analogového, digitálního signálu a funkcí pro spouštění. Box může vyhodnotit až 28 kanálů při frekvenci vzorku 125 kS/s na kanál s osmi kanály. DAQ typ 5697 lze instalovat pomocí portu USB 2.0, proto není systém závislý na rozhraní PCI, PCMCIA a může tak být jednoduše připojen k počítači. Napájení je přiváděno do boxu pomocí robustního konektoru na pojistky. Díky tomuto boxu je možné spouštět měření dálkově pomocí konektoru D-sub, který je jeho součástí ²².



Obr. 17 Box Kistler typ 5697A1 ²²

2.6.4 *Program DynoWare verze 3.0.9.0*







DynoWare je software pro záznam dat řezných sil při procesu obrábění. Program podporuje stacionární i rotační měřicí systém firmy Kistler. Tento program slouží k vizualizaci měřených křivek společně s užitečnými výpočty a grafickými funkcemi v reálném čase měření. Software umožňuje jednoduché konfigurace důležitých měřicích prvků.



Obr. 18 Vizualizace programu DynoWare 3.0.9.0

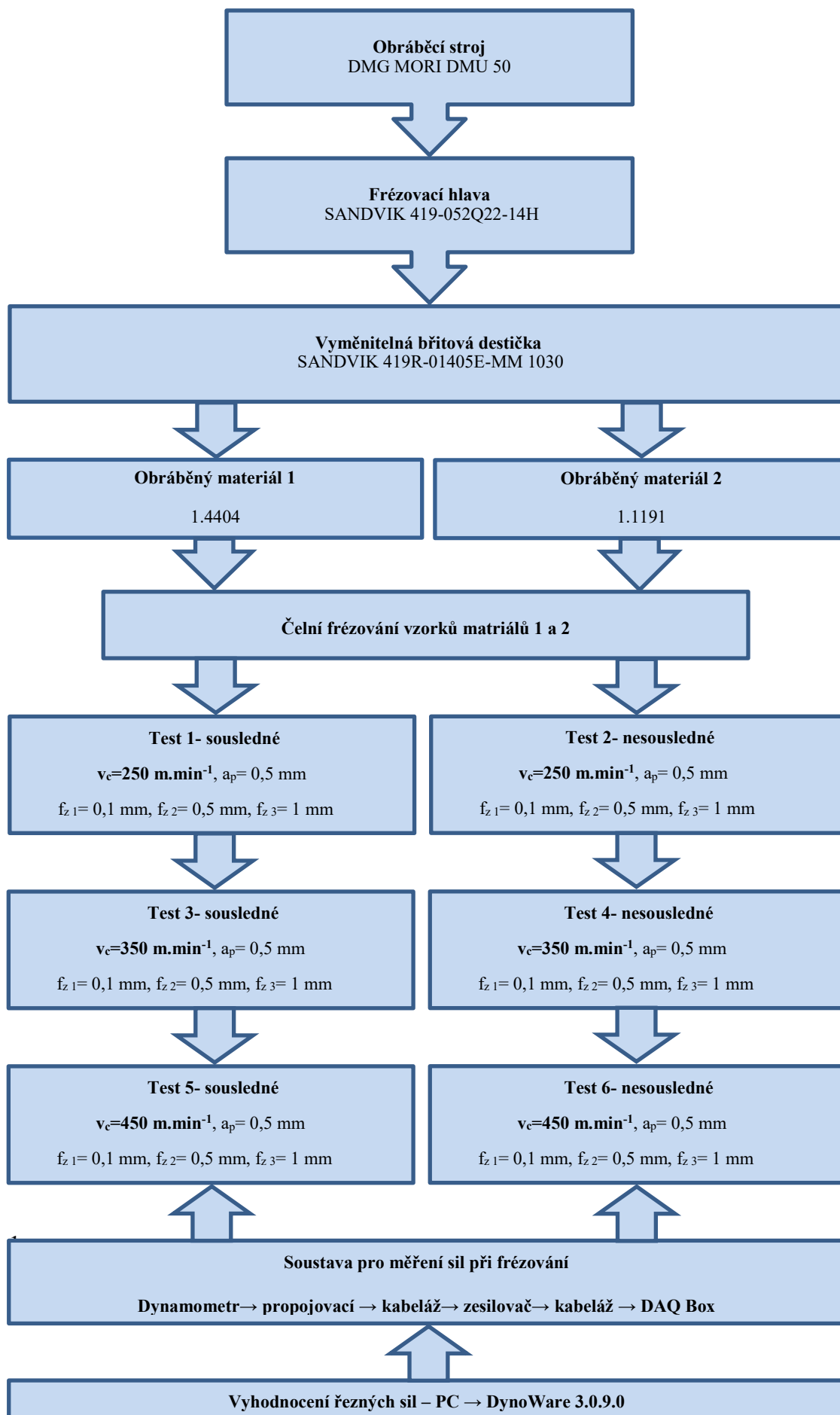
Program umožňuje nastavit popis měření (řezná rychlost, posuv, hloubku třísky, obráběný materiál, nástroj, otáčky atd.), aby bylo možné později dohledat měření. Před najetím do materiálu je potřeba v programu zapnout měření a vypnout jej až po vyjetí z materiálu. Software umožňuje při vyhodnocení signálu kompenzovat nežádoucí posun signálu např. nekonstantní povrch (vrtané otvory ve vzorku), nepříznivý vliv teploty při měření.

Tab. 12 Řetězec zařízení jednotlivých prvků, které byly potřebné zapojit pro měření sil ²³

Dynamometr	Propojovací kabel	Zesilovač	Propojovací kabely	DAQ box	PC s softwarem
					
Typ 9129AA	Typ 1677A5	Typ 5070 A	Typ 1700A11 Typ 1200A27	Typ 5697A1	DynoWare 3.0.9.0

2.7 Schéma řezných podmínek

Z důvodu přehlednosti zde uvádím schéma řezného postupu při frézování, kde je možné vidět, jak na sebe navazuje: obráběcí stroj, nástroj s příslušenstvím, materiál vzorků, řezné parametry a výsledné hodnoty řezných sil.



2.8 Řezné parametry prováděného experimentu

Oba vzorky z ocelí se obráběly určitými řeznými parametry. Každá z ocelí se frézovala souslednou a nesouslednou strategií. Obrábění probíhalo třemi řeznými rychlostmi a ke každé řezné rychlosti byly přiřazeny tři odlišné posuvy na zub. Byly známy parametry řezné rychlosti v_c a posuvu na zub f_z . Dopočítané řezné parametry se týkají otáček a posuvové rychlosti.

2.8.1 Příklad dopočítání řezných parametrů otáček a posuvové rychlosti

Známe hodnoty konkrétního příkladu:

Tab. 13 Známe parametry obrábění

Parametr	Značení a jednotka	Hodnota
Řezná rychlost	v_c [m.min ⁻¹]	250
Efektivní průměr záběru frézy	D [mm]	40
Posuv na zub	f_z [mm]	0,1
Hloubka řezu	a_p [mm]	0,5

Výpočet otáček: ²⁴

$$\begin{aligned}n &= \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} & (2.8.1) \\n &= \frac{250 \cdot 1000}{\pi \cdot 40} \\n &= 1989 \text{ min}^{-1}\end{aligned}$$

Výpočet posuvové rychlosti: ²⁴

$$\begin{aligned}v_f &= f_z \cdot n \cdot z_n & (2.8.2) \\v_f &= 0,1 \cdot 1989 \cdot 1 \\v_f &= 198,9 \text{ mm.min}^{-1}\end{aligned}$$

2.8.2 Všechny parametry experimentu

Dle řezných rychlosti 250, 350 a 450 m.min⁻¹ byly dopočítány jednotlivé otáčky. K jednotlivým otáčkám a posuvům na zub byly doplněny posuvové rychlosti, viz tabulka 14.

Tab. 14 S dopočetnými parametry otáček a posuvové rychlosti

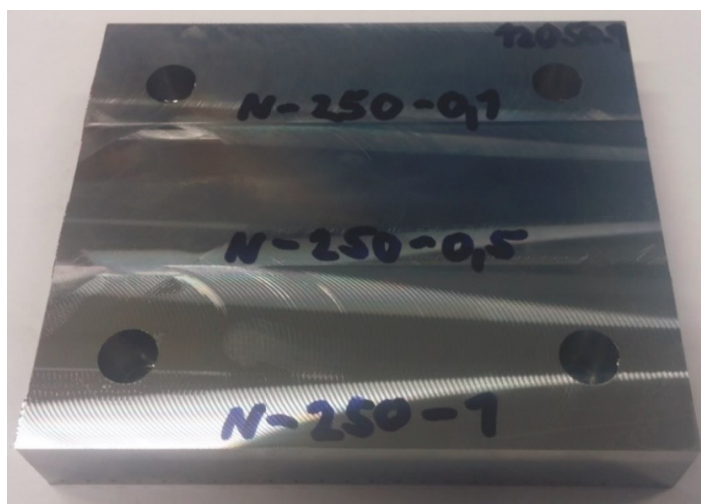
v_c	f_z	n	v_f
[m.min ⁻¹]	[mm]	[min ⁻¹]	[m.min ⁻¹]
250	0,1	1989	198,9
	0,5		994,5
	1		1989
350	0,1	2785	278,5
	0,5		1392,5
	1		2785
450	0,1	3580	358
	0,5		1790
	1		3580

2.9 Označování vzorků oceli

Pro přehlednost byl vytvořen označovací systém, který určuje druh vzorku oceli, použitou řeznou strategií a řezné parametry frézování.

12 050.9 – N – 250 – 0,1

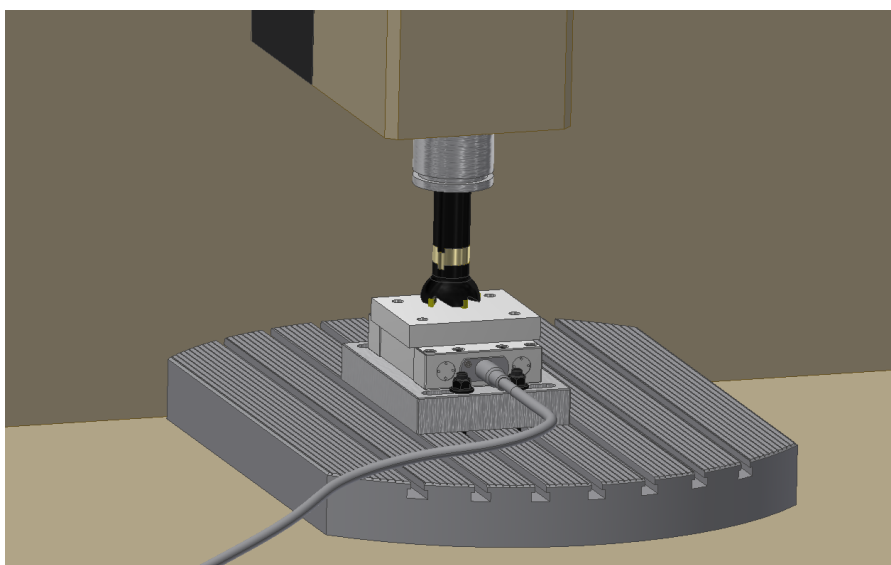
12 050.9	-	označení obráběného materiálu
N	-	nesousledné frézování vzorku
250	-	řezná rychlost v_c [m·min ⁻¹]
0,1	-	posuv na zub f_z [mm]



Obr. 19 Značení vzorku oceli 12 050.9

2.10 Model zjednodušené situace obrábění při testu

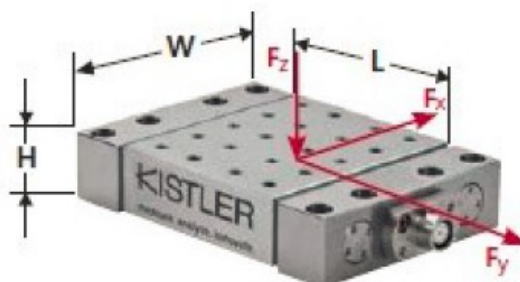
Pro lepší orientaci a vizualizaci byla vytvořena zjednodušená situace praktického testu vysokorychlostního frézování na pěti osém frézovacím centru DMG MORI DMU 50. Zjednodušený model byl vytvořen v programu Autodesk Inventor Professional 2017. Hlavními součástmi modelu je otočný upínací stůl, na kterém je připevněna vymezovací podložka pro uchycení dynamometru KISTLER typ 9129. Na dynamometr je uchycen vzorek obráběného materiálu (oceli 12 050.9 a 17 349.4). Rovněž byl vymodelován vřeteník, vřeteno, upínací trn a frézovací hlava s vyměnitelnými břitovými destičkami.



Obr. 20 Zjednodušený model situace testu v programu Autodesk Inventor

2.11 Působení sil u dynamometru Kistler 9129 AA

Pro přehlednost, v jakých osách dynamometr měří jakou sílu, uvádí firma Kistler na svých stránkách schéma dynamometru s grafickým označením jednotlivých sil, které upřesňují směry a smysly působení jednotlivých sil F_x , F_y a F_z .



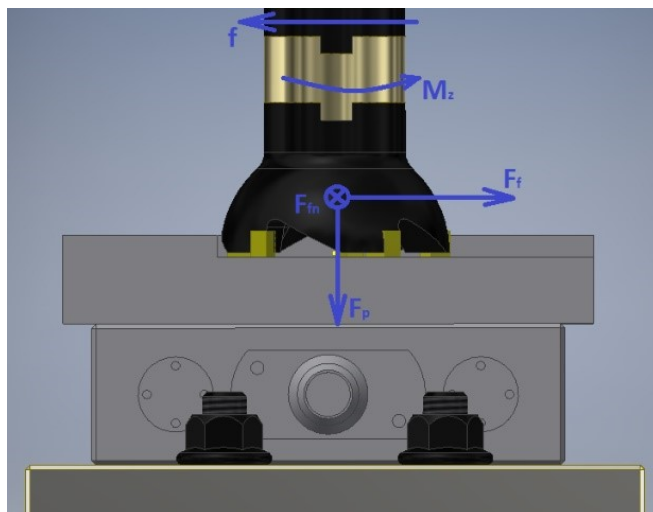
Obr. 21 Obrázek dynamometru s grafickým označením jednotlivých sil ²³

Síly F_x , F_y a F_z se v procesu řezu mění na síly F_f , F_{fn} a F_p . V programu Autodesk Inventor byl vytvořen pohled na situaci testu, viz obrázek 22, který znázorňuje směry působení jednotlivých sil, posuvu a točivého momentu. Aby byly jasnější vztahy mezi jednotlivými silami, uvádím níže jejich návaznost.

$F_x = F_f$ – řezné síly, které působí ve směru posuvu nástroje

$F_y = F_{fn}$ – normálové řezné síly, které jsou kolmé k řezné složce F_x

$F_z = F_p$ – řezné síly pasivní ²⁵



Obr. 22 Model situace testu vytvořený v programu Autodesk Inventor s vyznačenými směry působení sil, posuvy a momenty.

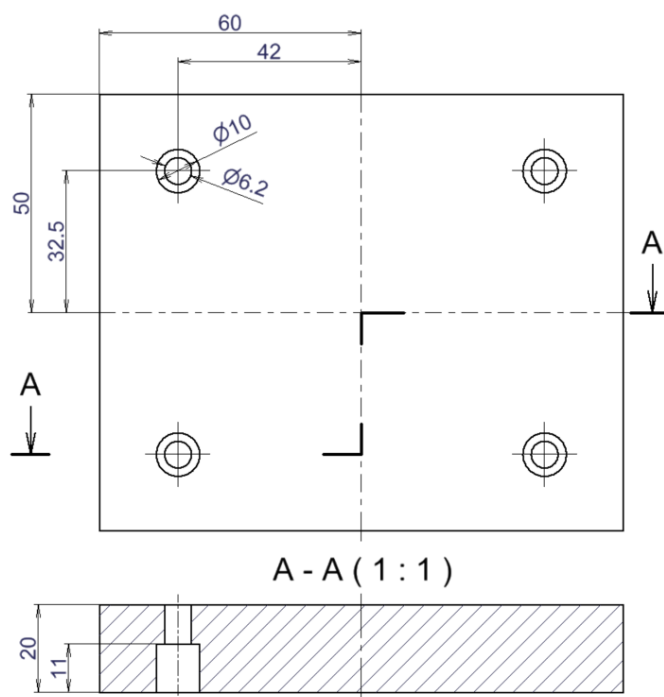
2.12 Upnutí dynamometru a vzorku

Pro upnutí dynamometru byla použita vymežovací deska, kterou bylo třeba použít kvůli neshodnosti roztečí otvorů v těle dynamometru a T drážek v upínacím stole frézky. Vymežovací deska byla upnuta ke stolu frézky čtyřmi šrouby M 10 délky 55 mm. Dynamometr byl k vymežovací desce připevněn pomocí osmi šroubů M 5 délky 40 mm.



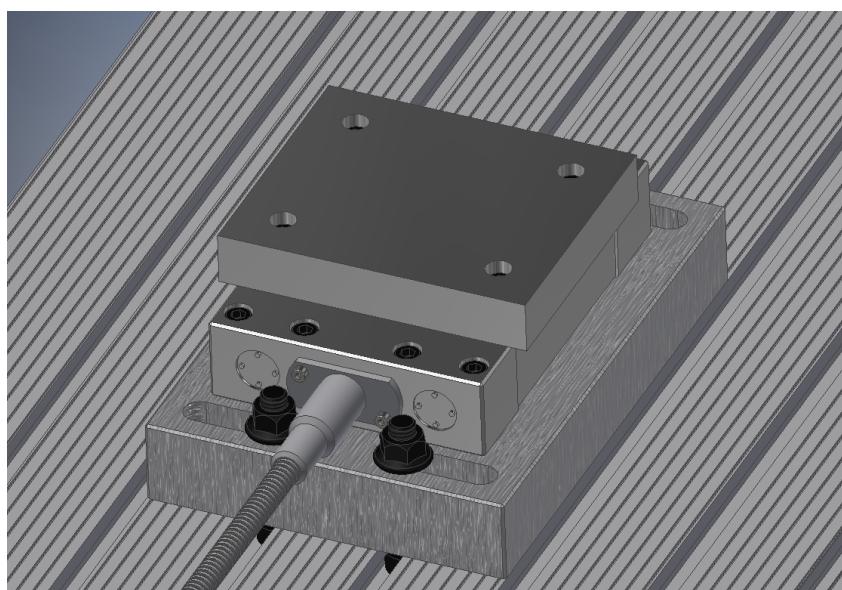
Obr. 23 Reálné upnutí dynamometru a vzorku na stroji

Vzorky musely být přizpůsobeny tak, aby je bylo možné připevnit na dynamometr. Rozměry vzorků obou materiálů byly upraveny na kvádr o rozměrech 120 x 100 x 20 mm. Díry o průměru 6,2 mm se zahloubením o průměru 10 mm byly vyvrtány v takové rozteči, aby přes ně bylo možné prostrčit šrouby M6 a zašroubovat je do upevňovací desky dynamometru. Pro lepší představu uvádím vzorek s jeho rozměry na obrázku 24 níže.



Obr. 24 Vzorek s okótovanými rozměry

Pro lepší vizualizaci byl princip upevnění vzorku a dynamometru na stroji vymodelován v programu Autodesk Inventor Professional 2017.



Obr. 25 Sestava vymežovací podložky, základní desky dynamometru Kistler a vzorku oceli

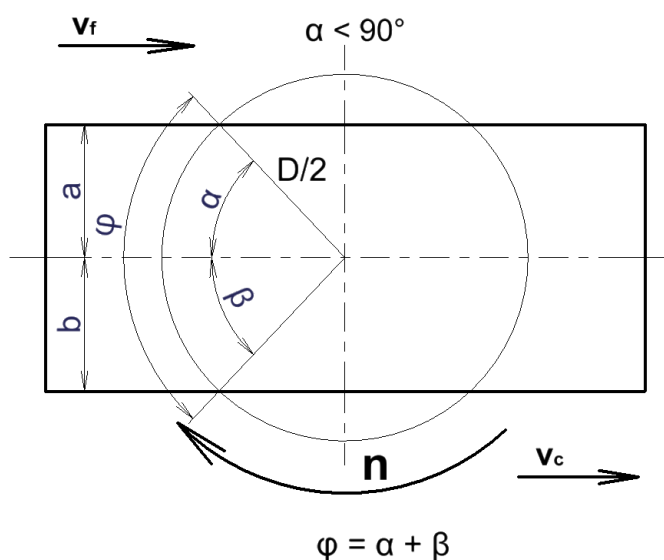
3 Stanovení výpočtu řezných sil

Pro výpočet složek sil a jejich poměrů je velmi důležité určit úhel záběru čelní frézy φ . Existují dvě varianty pro výpočet úhlu záběru frézy: varianta, kde oba boky čelní frézy vystupují z obrobku a varianta, kde vystupuje pouze jedna strana této frézy.

3.1 Výpočet úhlu záběru φ

Do výpočtu celkové výsledné síly bude zapotřebí určit úhel záběru φ . Tento úhel vychází ze vzájemné pozice nástroje vůči obrobku při úběru materiálu. Mohou nastat dvě možnosti polohy nástroje vůči obrobku.

- a) První varianta nastává v případě, že oba boky frézy vystupují ze záběru a jsou známe jejich obě vzdálenosti osy nástroje (vzdálenost a , b).



Obr. 26 První varianta úhlu záběru φ při frézování ²⁶

Postup výpočtu úhlů α a β : ²⁶

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{a}{D/2}\right) \quad (3.1.1)$$

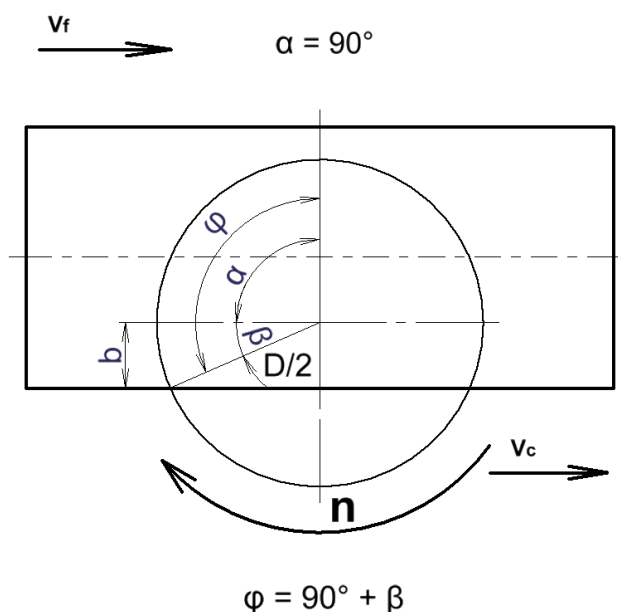
$$\beta = \sin^{-1}\left(\frac{b}{D/2}\right) \quad (3.1.2)$$

Výslednou hodnotu úhlu φ lze vypočítat jako součet těchto uhlů: ²⁶

$$\varphi = \alpha + \beta \quad (3.1.3)$$

Tuto variantu výpočtu (viz obr. 26) je možné použít jen tam, kde bříty nástroje vybíhají na obou stranách ze záběru.

- b) Ke druhé variantě dochází, když břit nástroje vybíhá pouze na jedné straně ze záběru. K této variantě dochází právě při našem frézování vzorků obou materiálů. Schéma druhé varianty můžeme vidět na obr. 27



Obr. 27 Druhá varianta úhlu záběru φ při frézování ²⁶

Postup výpočtu úhlů β a doplnění uhlu α : ²⁶

$$\beta = \sin^{-1}\left(\frac{b}{D/2}\right)$$

$$\alpha = 90^\circ$$
(3.1.4)

Výslednou hodnotu úhlu φ lze vypočítat jako součet úhlů α a β : ²⁶

$$\varphi = \alpha + \beta$$

3.2 Teoretický výpočet výsledné řezné síly

K teoretickému výpočtu byla použita kniha, ve které byl uveden vztah pro teoretický výpočet výsledné síly. Z technické příručky Sandvik Coromant byly získány hodnoty exponentu m_c a hodnota měrné síly k_{c1} pro ocel 1.1191.

Tab. 15 Hodnoty exponentu m_c a měrné řezné síly k_{c1} z technické příručky pro ocel 1.1191²⁷

Parametr	Značení a jednotka	Hodnota
Měrná řezná síla	k_{c1} [N.mm ⁻²]	1600
Materiálová konstanta	m_c [-]	0,25

Po dosažení jednotlivých hodnot do vztahu 3.1.5 nám vyjde velikost teoretické výsledné síly pro hloubku řezu 0,5 mm a posuv na zub 0,1 mm. V tomto vzorci není zahrnuta řezná rychlost, ale pouze posuv na zub, který znatelněji ovlivňuje výslednou řeznou sílu.

Teoretický výpočet výsledné řezné rychlosti F_c :²⁷

$$F_c = k_{c1} \cdot a_p \cdot f_z^{(1-m_c)} \cdot \sin(\kappa_r)^{-m_c} \cdot \sin(\varphi)^{(1-m_c)} \quad (3.2.1)$$

$$F_c = 1600 \cdot 0,5 \cdot 0,1^{(1-0,25)} \cdot \sin(19)^{(-0,25)} \cdot \sin(130,54)^{(1-0,25)}$$

$$F_c = 153 \text{ N}$$

Kde je:

- a_p hloubka řezu [mm]
- f_z posuvy na zub [mm]
- F_c výsledná síla [N]
- φ úhel záběru frézy v materiálu [°]
- κ_r úhel hlavního nastavení ostří [°]²⁷

V tabulce 16 se nacházejí výsledky všech teoretických řezných sil pro konstantní hloubku řezu 0,5 mm a všechny tři posuvy na zub 0,1 mm, 0,5 mm a 1 mm.

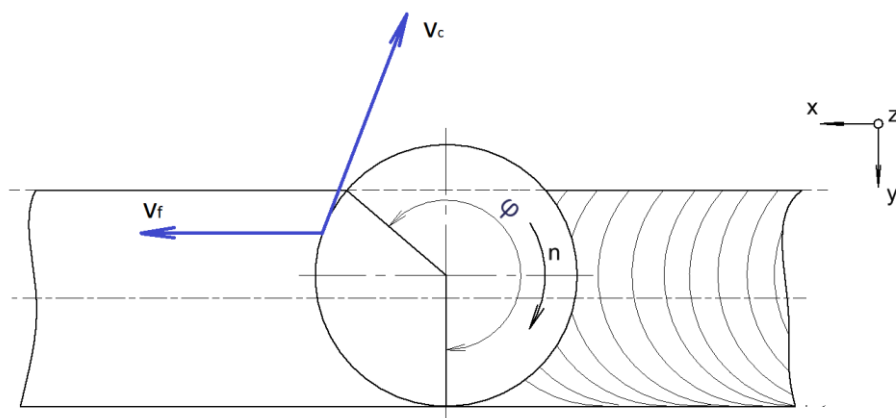
Tab. 16 Doplněnými hodnotami teoretických výsledných sil

Posuv na zub f_z	Hloubka řezu a_p	Teoretická výsledná řezná síla F_c
[mm]	[mm]	[N]
0,1	0,5	153
0,5		512,5
1		862

3.3 Rozklady sil

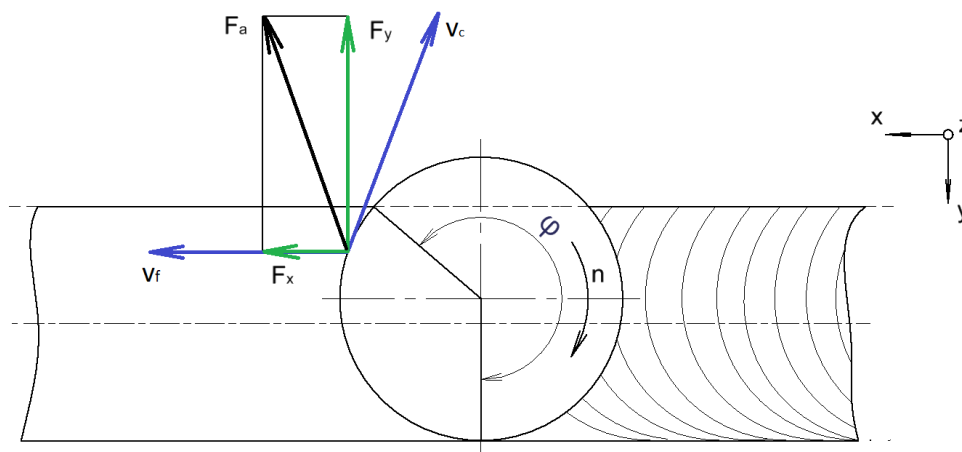
Postup rozkladu sil:

Z obrázku 28 je možné vidět úhel záběru frézy ϕ a směry působení složek řezné a posuvové rychlosti.



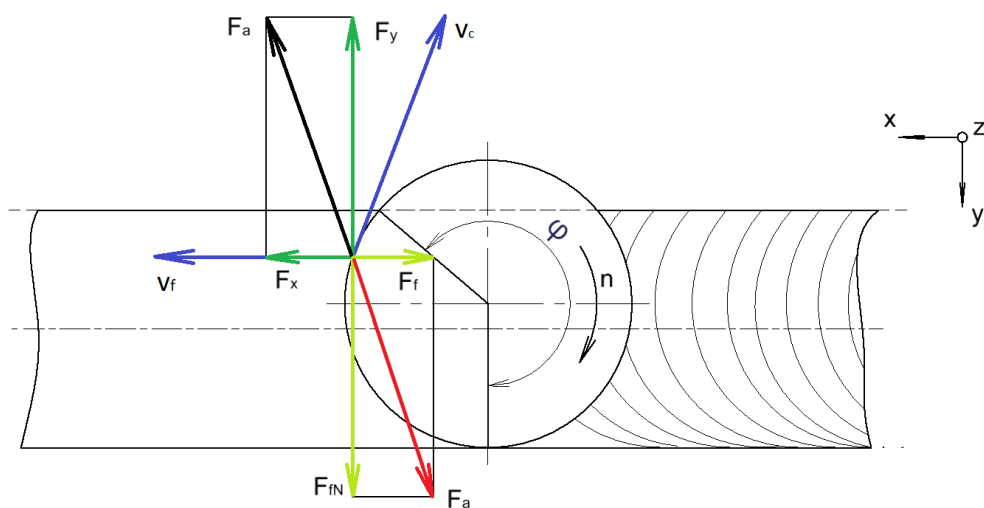
Obr. 28 Schéma působení řezné a posuvové rychlosti ²⁵

Od složek řezné a posuvové rychlosti se odvíjí síly F_x a F_y , které byly zaznamenány na dynamometru a tvoří rozklad výsledné síly F_a , viz obrázek 29.



Obr. 29 Schéma rozkladu síly F_a na síly F_x a F_y ²⁵

V opačném směru působení složek sil F_x a F_y působí síly F_f a F_{fN} . Síle F_x odpovídá složka posuvové síly F_f . Síle F_y odpovídá složka normálové posuvové síly F_{fN} viz obrázek 30.



Obr. 30 Schéma rozkladu síly F_a na síly F_f a F_{fN} ²⁵

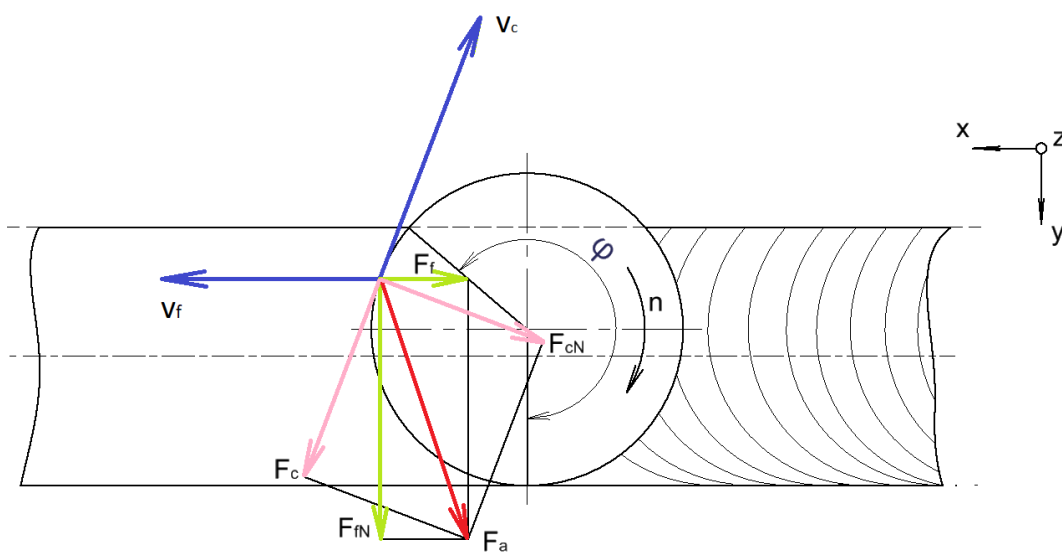
Ze vztahu níže vidíme návaznosti jednotlivých sil:²⁵

$$F_x = F_f \quad a \quad F_y = F_{fN} \quad (3.3.1)$$

Výpočet výsledné síly:²⁵

$$F_a = \sqrt{F_f^2 + F_{fN}^2} \quad (3.3.2)$$

Na obrázku 31 se výslednice řezné síly F_a rozkládá na řeznou sílu F_{cN} a F_c .



Obr. 31 Schéma rozkladu síly F_a na síly F_c a F_{cN} ²⁵

Pro výpočet reálných výsledných sil naměřených na dynamometru byly zvoleny maximální a minimální hodnoty sil. Do výpočtu byla vybrána největší hodnota síly jak pro F_x , F_y a F_z . Když se jednalo o zápornou hodnotu, byla volena její absolutní hodnota.

Maximální hodnoty sil F_x a F_y v absolutních hodnotách:

$$F_x = 154,1 \text{ N}$$

$$F_y = 196,6 \text{ N}$$

Síly F_x a F_y odpovídají silám F_f a F_{fN} v opačném smyslu:

$$F_x = F_f$$

$$F_y = F_{fN}$$

Výsledná síla F_a se dopočítává pomocí Pythagorovy věty:

$$F_a = \sqrt{F_f^2 + F_{fN}^2}$$

$$F_a = \sqrt{154,1^2 + 196,6^2}$$

$$F_a = 249,796 \text{ N}$$

Maticový propočet pro dopočet sil F_c , F_{cN} a F_p :

$$\begin{bmatrix} \cos(\varphi) & \sin(\varphi) & 0 \\ \sin(\varphi) & -\cos(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_f \\ F_{fN} \\ F_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_c \\ F_{cN} \\ F_a \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cos(130,54) & \sin(130,54) & 0 \\ \sin(130,54) & -\cos(130,54) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 154,1 \\ 196,6 \\ 249,8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_c \\ F_{cN} \\ F_a \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -0,64997 & 0,75995 & 0 \\ 0,75995 & 0,64997 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 154,1 \\ 196,6 \\ 249,8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -100,16 + 149,406 + 0 \\ 117,108 + 127,78 + 0 \\ 0 + 0 + 249,8 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} F_c \\ F_{cN} \\ F_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 49,25 \\ 244,89 \\ 249,8 \end{bmatrix}$$

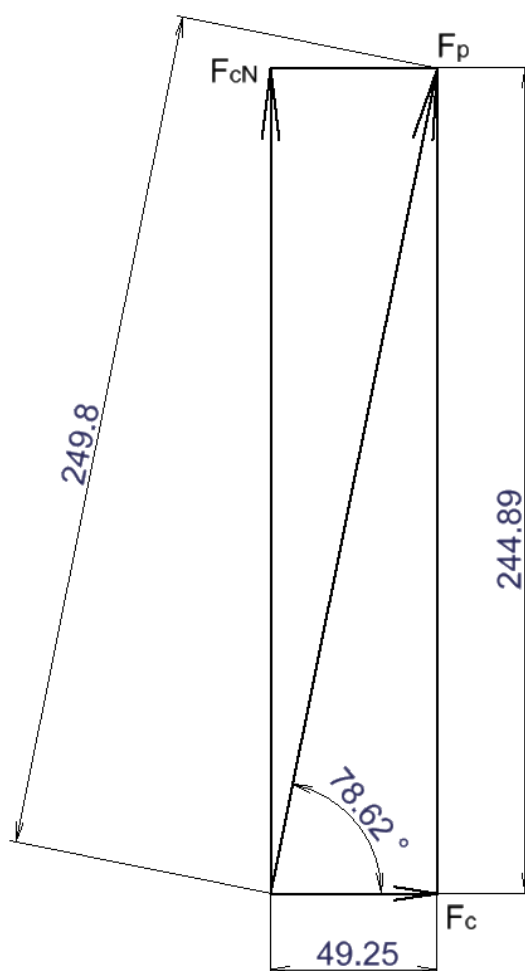
Dopočtené hodnoty z matice:

$$F_C = 49,25 \text{ N}$$

$$F_{cN} = 244,89 \text{ N}$$

$$F_p = 249,8 \text{ N}$$

Pro kontrolu maticového výpočtu bylo zvoleno grafické prokreslení silových poměrů v programu Autodesk Inventor.



Obr. 33 Grafický poměr sil F_C , F_{cN} a F_p pro kontrolu

4 Sjednocení a dopočítání hodnot sil pro obrábění oceli

Pomocí programu Dynoware bylo možné určit maximální a minimální hodnoty složek sil F_x , F_y a F_z . Pro výpočet byla důležitá síla F_x , která odpovídá posuvové složce síly F_f . Stejně tak důležitá byla složka F_y , které odpovídá normála k posuvové složce síly F_{fn} . Už méně důležitá byla složka síly F_z , této složce odpovídá pasivní složka síla F_p .

4.1 Dopčítané hodnoty sil pro obrábění oceli C 45 E (ČSN 12 050.9)

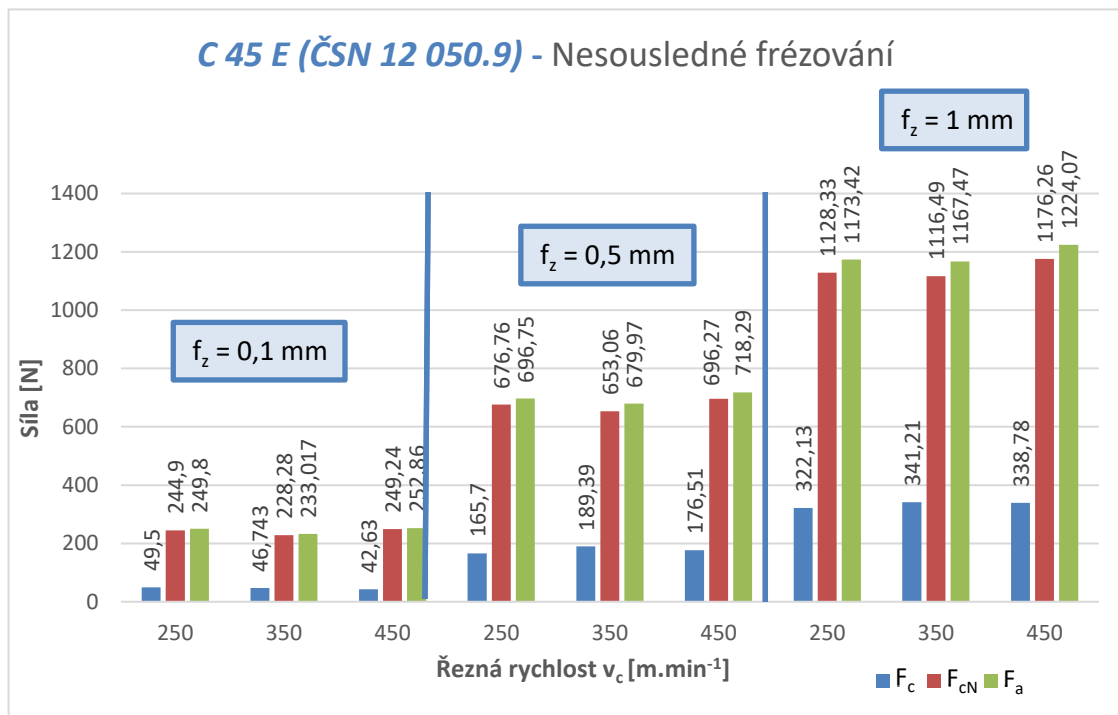
Dle výše uvedeného vztahu 3.3.2 byly dopočteny výsledné síly F_a pro jednotlivé řezné parametry. Z výsledných sil byly dopočteny složky sil F_c a F_{cN} , které byly dopočteny maticovým vztahem 3.3.3.

4.1.1 Nesousledné frézování oceli C 45 E (ČSN 12 050.9)

V tabulce níže se nacházejí všechny určené a dopočítané hodnoty sil pro jednotlivé parametry řezu. Jednalo se o frézování oceli C45 E (ČSN 12 050.9) nesouslednou strategií. Následně budou v grafu 1 porovnány hodnoty jednotlivých silových poměrů při posuvu na zub 0,1 mm, 0,5mm a 1 mm.

Tab. 17 Hodnoty sil při nesousledné frézování oceli C 45 E (ČSN 12 050.9)

C 45 E (ČSN 12 050.9) - Nesousledné						
Parametry obrábění		Síly z dynamometru		Dopčítané síly		
v_c [m.min ⁻¹]	f_z [mm]	F_x [N]	F_y [N]	F_a [N]	F_c [N]	F_{cN} [N]
250	0,1	154,1	196,6	249,8	49,25	244,9
250	0,5	406,6	565,8	696,75	165,7	676,76
250	1	648,1	978,2	1173,42	322,13	1128,33
350	0,1	143,1	183,9	233,02	46,74	228,28
350	0,5	373,2	568,4	679,97	189,39	653,06
350	1	626,7	985	1167,47	341,21	1116,49
450	0,1	161,7	194,4	252,86	42,63	249,24
450	0,5	414,4	586,7	718,29	176,51	696,27
450	1	673,7	1022	1224,07	338,78	1176,26



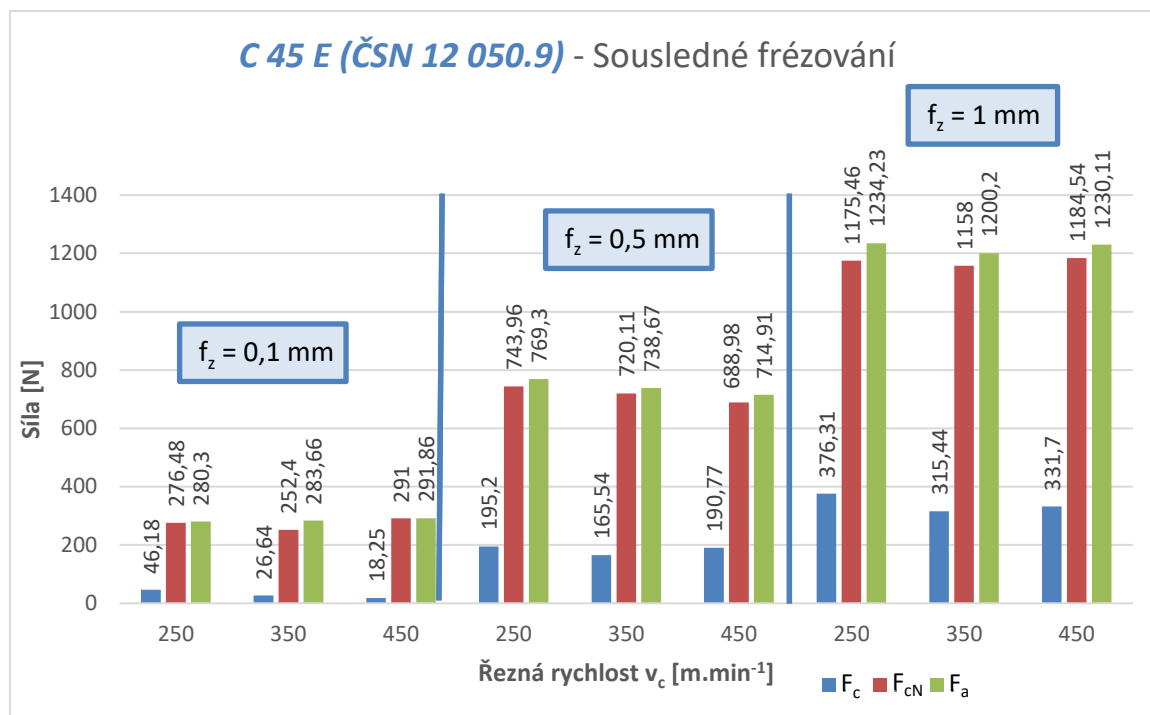
Graf 1. Porovnání řezných sil F_c , F_{cN} a F_a u nesousledného frézování oceli 12 050.9, při parametrech řezné rychlosti 250, 350 a 450 m.min⁻¹ a posuvu na zub 0,1 mm, 0,5 mm a 1 mm.

4.1.2 Sousedné frézování oceli C 45 E (ČSN 12 050.9)

V tabulce níže se nacházejí všechny určené a dopočítané hodnoty sil pro jednotlivé parametry řezu. Jednalo se o frézování oceli C 45 E (ČSN 12 050.9) souslednou strategií. Následně budou v grafu 2 porovnány hodnoty jednotlivých silových poměrů při posuvu na zub 0,1 mm, 0,5 mm a 1 mm.

Tab. 18 Hodnoty sil při sousledném frézování oceli C 45 E (ČSN 12 050.9)

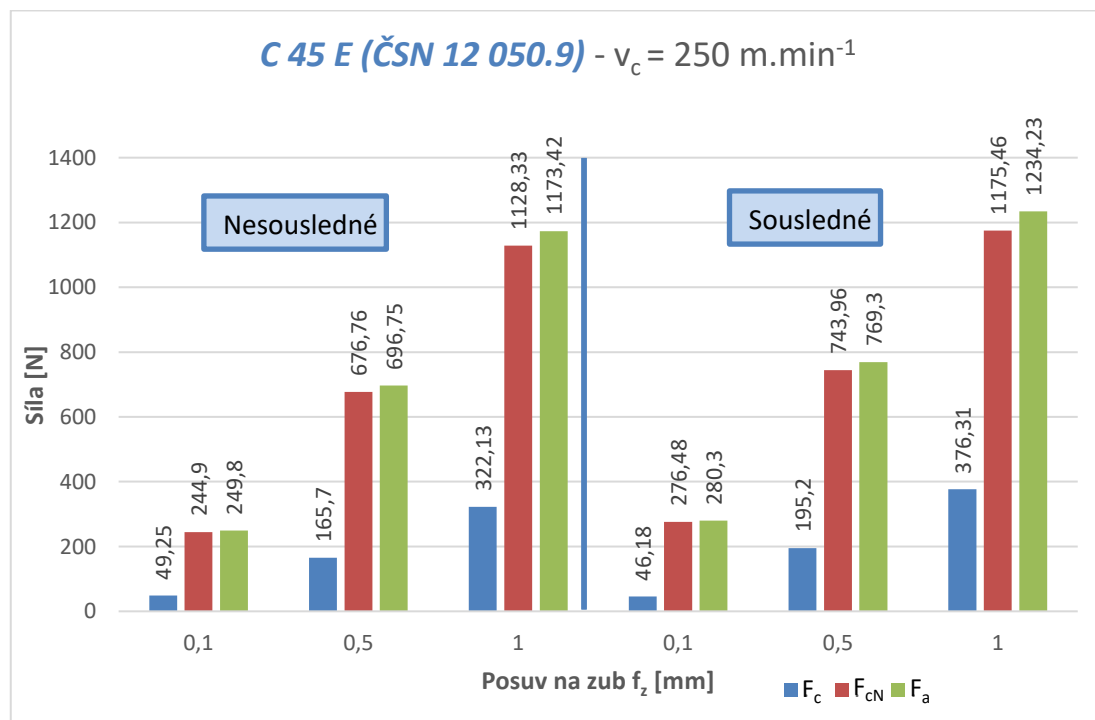
C 45 E (ČSN 12 050.9) - Sousedné						
Parametry obrábění		Síly z dynamometru		Dopočítané síly		
v_c [m.min ⁻¹]	f_z [mm]	F_x [N]	F_y [N]	F_a [N]	F_c [N]	F_{cN} [N]
250	0,1	180,1	214,8	280,3	46,18	276,48
250	0,5	438,5	631,9	769,3	195,2	743,96
250	1	648,7	1050	1234,23	376,31	1175,46
350	0,1	197,3	203,8	283,66	26,64	252,4
350	0,5	440,3	593,1	738,67	165,54	720,11
350	1	675	992,4	1200,2	315,44	1158
450	0,1	209,5	203,2	291,86	18,25	291
450	0,5	399,6	592,8	714,91	190,77	688,98
450	1	684,6	1022	1230,11	331,7	1184,54



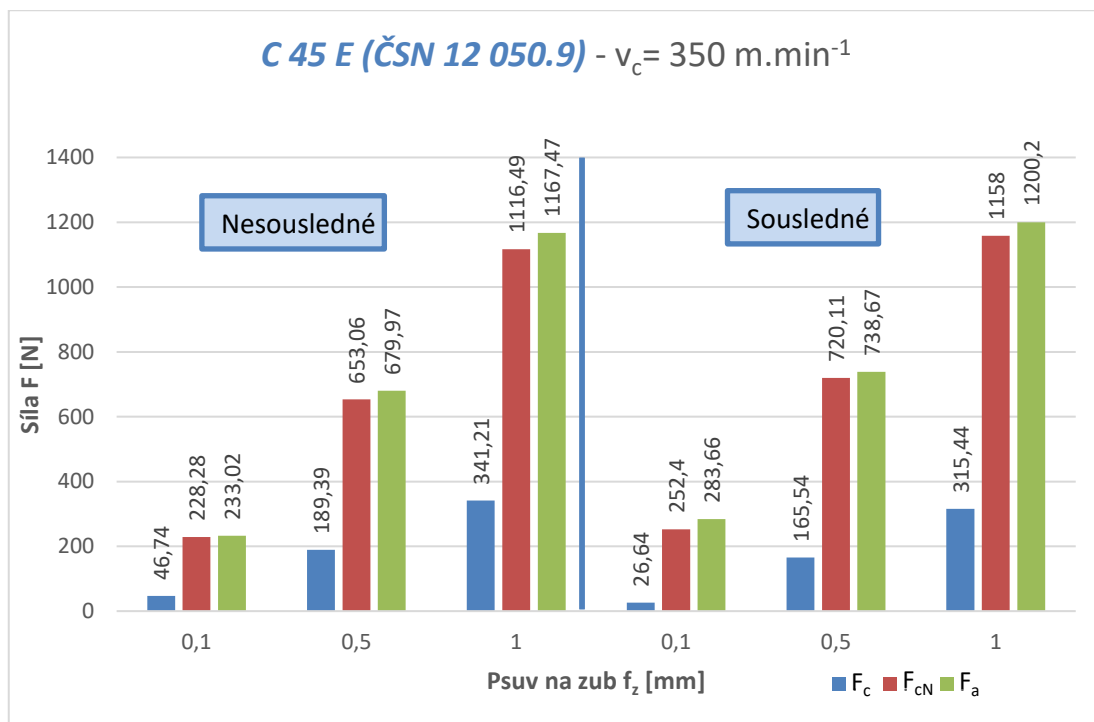
Graf 2. Porovnání řezných sil F_c , F_{cN} a F_p u sousledného frézování oceli 12 050.9, při parametrech řezné rychlosti 250, 350 a 450 m.min⁻¹ a posuvu na zub 0,1 mm, 0,5 mm a 1 mm.

4.1.3 Porovnání sousledného a nesousledného frézování oceli C 45 E

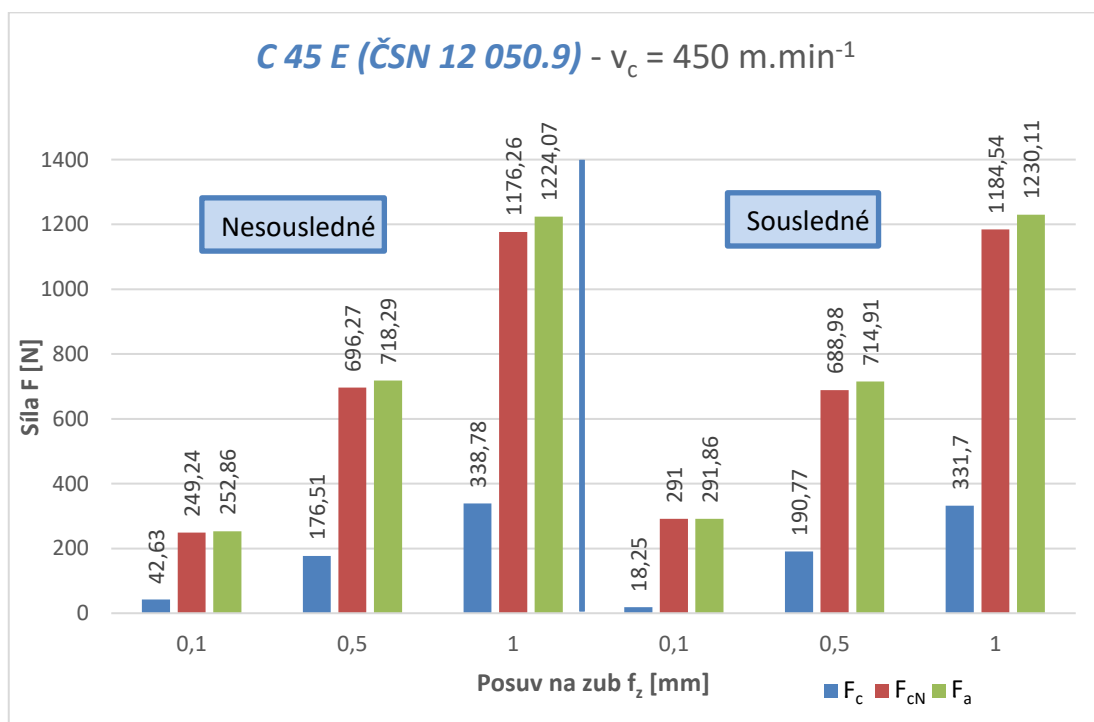
Následuje porovnání silových poměrů u sousledné a nesousledné strategii čelního frézování oceli C45 E (ČSN 12 050.9), při stejných parametrech řezu.



Graf 3. Porovnání řezných sil F_c , F_{cN} a F_p u nesousledného a sousledného frézování oceli 12 050.9, při parametrech řezné rychlosti 250 m.min⁻¹ a posuvu na zub 0,1 mm, 0,5 mm a 1 mm.



Graf 4. Porovnání řezných sil F_c , F_{cN} a F_p u nesousledného a sousledného frézování oceli 12 050.9, při parametrech řezné rychlosti 350 m.min^{-1} a posuvu na zub 0,1 mm, 0,5 mm a 1 mm.



Graf 5. Porovnání řezných sil F_c , F_{cN} a F_p u nesousledného a sousledného frézování oceli 12 050.9, při parametrech řezné rychlosti 450 m.min^{-1} a posuvu na zub 0,1 mm, 0,5 mm a 1 mm.

4.2 Dopočítané hodnoty sil pro frézování oceli 316L (ČSN 17 349.4)

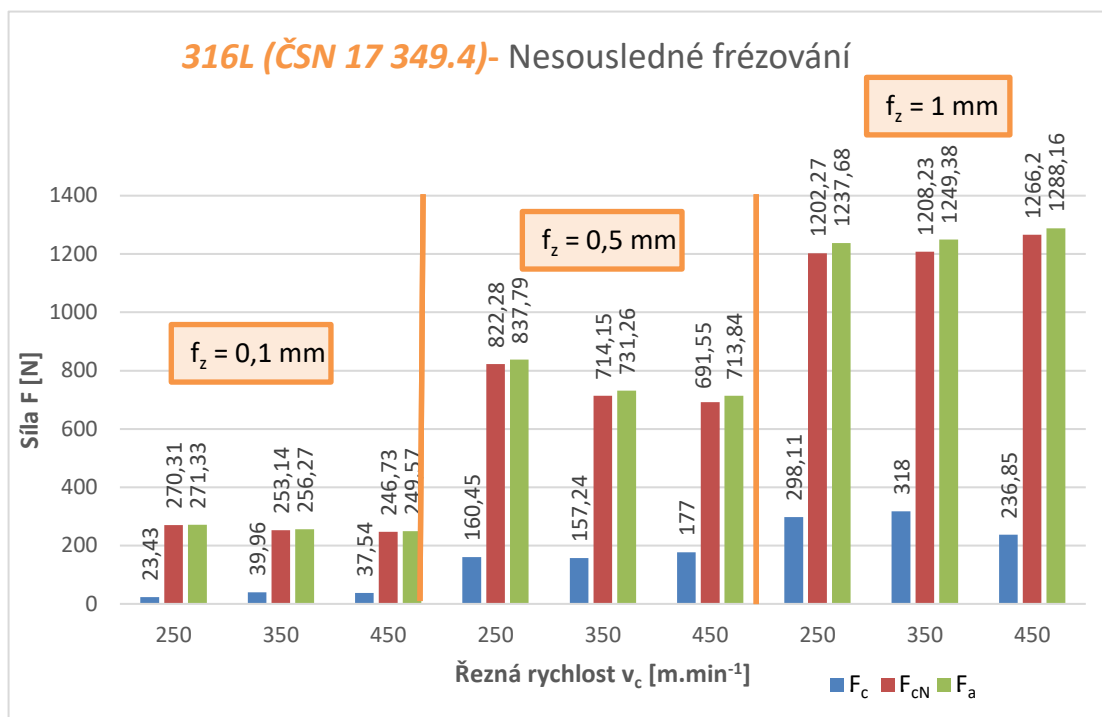
Dle výše uvedeného vztahu 3.3.2 byly dopočteny výsledné síly F_a pro jednotlivé řezné parametry. Z výsledných sil byly dopočteny složky sil F_c a F_{cN} , které byly dopočteny maticovým vztahem 3.3.3.

4.2.1 Nesousledné frézování oceli 316L (ČSN 17 349.4)

V tabulce níže se nacházejí všechny určené a dopočítané hodnoty sil pro jednotlivé parametry řezu. Jednalo se o frézování oceli 316L (ČSN 17 349.4) nesouslednou strategií. Následně budou v grafu 6 porovnány hodnoty jednotlivých silových poměrů při posuvu na zub 0,1 mm, 0,5 mm a 1 mm.

Tab. 19 Hodnoty sil při nesousledném frézování oceli 316L (ČSN 17 349.4)

316L (ČSN 17 349.4) - Nesousledné						
Parametry obrábění		Síly z dynamometru		Dopočítané síly		
v_c [m.min ⁻¹]	f_z [mm]	F_x [N]	F_y [N]	F_a [N]	F_c [N]	F_{cN} [N]
250	0,1	190,2	193,5	271,33	23,43	270,31
250	0,5	520,6	656,4	837,79	160,45	822,28
250	1	719,9	1008	1237,68	298,11	1202,27
350	0,1	166,4	194,9	256,27	39,96	253,14
350	0,5	440,5	583,7	731,26	157,24	714,15
350	1	711,5	1027	1249,38	318	1208,23
450	0,1	163,1	188,9	249,57	37,54	246,73
450	0,5	410,5	584	713,84	177	691,55
450	1	808,3	1003	1288,16	236,85	1266,2



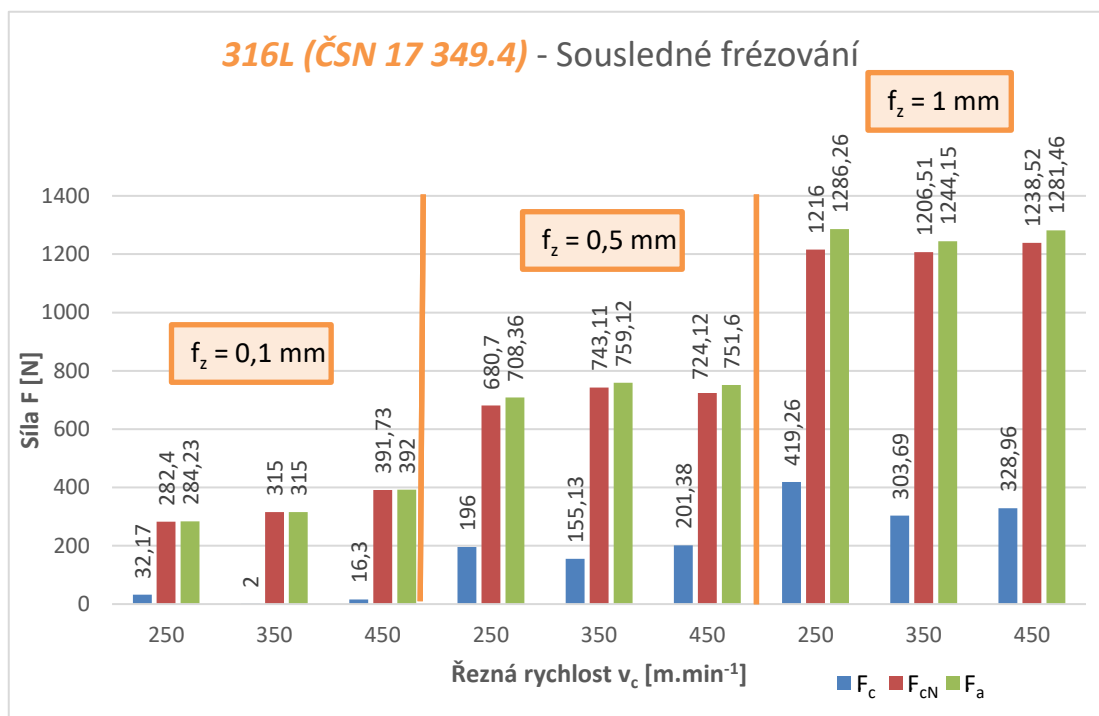
Graf 6. Porovnání řezných sil F_c , F_{cN} a F_p u nesousledného frézování oceli 17 349.4, při parametrech řezné rychlosti 250, 350 a 450 $m \cdot min^{-1}$ a posuvu na zub 0,1 mm, 0,5 mm a 1 mm.

4.2.2 Sousedné frézování oceli 316L (ČSN 17 349.4)

V tabulce níže se nacházejí všechny určené a dopočítané hodnoty sil pro jednotlivé parametry řezu. Jednalo se o frézování oceli 316L (ČSN 17 349.4) souslednou strategií. Následně budou v grafu 7 porovnány hodnoty jednotlivých silových poměrů při posuvu na zub f_z 0,1 mm, 0,5 mm a 1 mm.

Tab. 20 Hodnoty sil při sousledném frézování oceli 316L (ČSN 17 349.4)

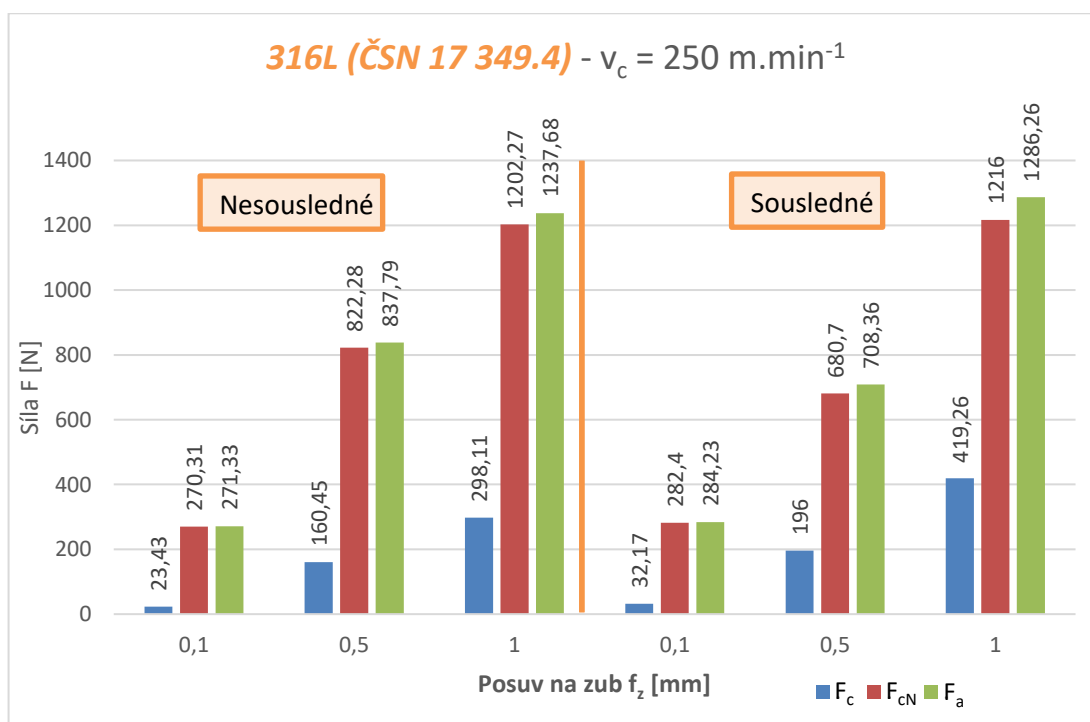
316L (ČSN 17 349.4) - Sousedné						
Parametry obrábění		Síly z dynamometru		Dopočítané síly		
v_c [$m \cdot min^{-1}$]	f_z [mm]	F_x [N]	F_y [N]	F_a [N]	F_c [N]	F_{cN} [N]
250	0,1	193,7	208	284,23	32,17	282,4
250	0,5	389,9	591,4	708,36	196	680,7
250	1	651,6	1109	1286,26	419,26	1216
350	0,1	238,1	206,3	315	2	315
350	0,5	463,9	600,9	759,12	155,13	743,11
350	1	719,5	1015	1244,15	303,69	1206,51
450	0,1	287,1	267	392	16,3	391,73
450	0,5	419,4	623,7	751,6	201,38	724,12
450	1	727,4	1055	1281,46	328,96	1238,52



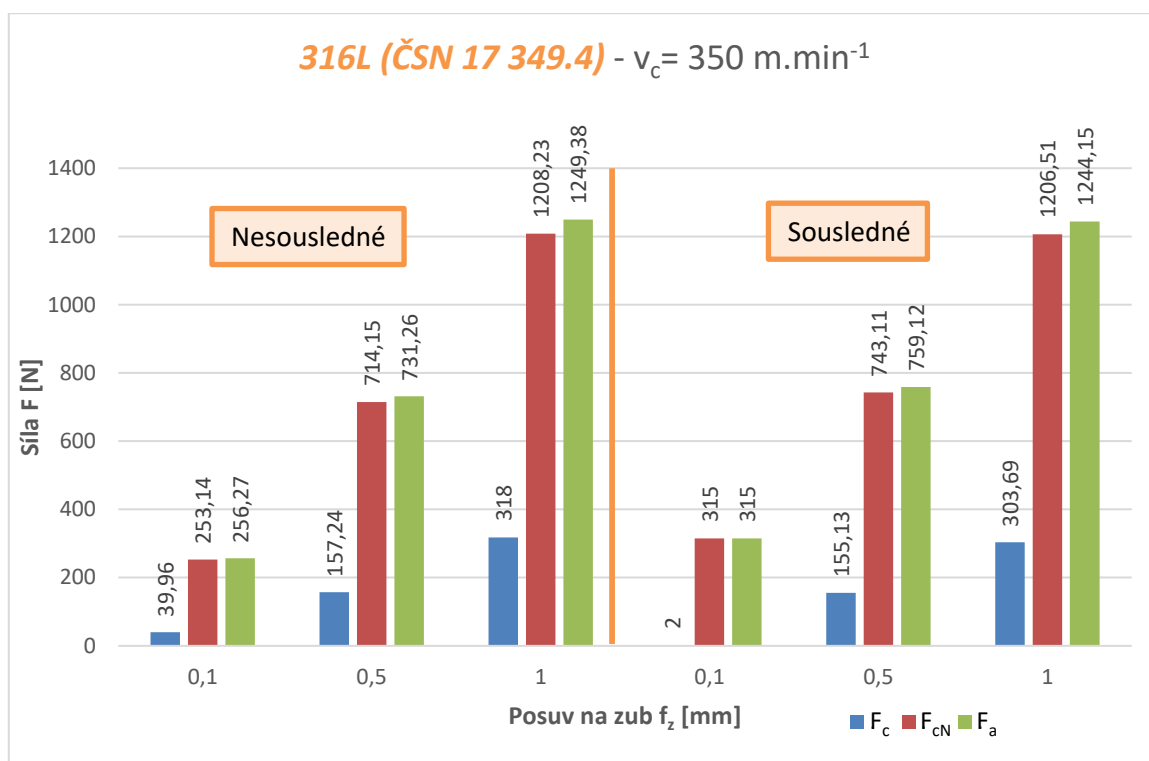
Graf 7. Porovnání řezných sil F_c , F_{cN} a F_p u sousledného frézování oceli 17 349.4, při parametrech řezné rychlosti 250, 350 a 450 m.min⁻¹ a posuvu na zub 0,1 mm, 0,5 mm a 1 mm.

4.2.3 Porovnání sousledného a nesousledného frézování oceli 316L

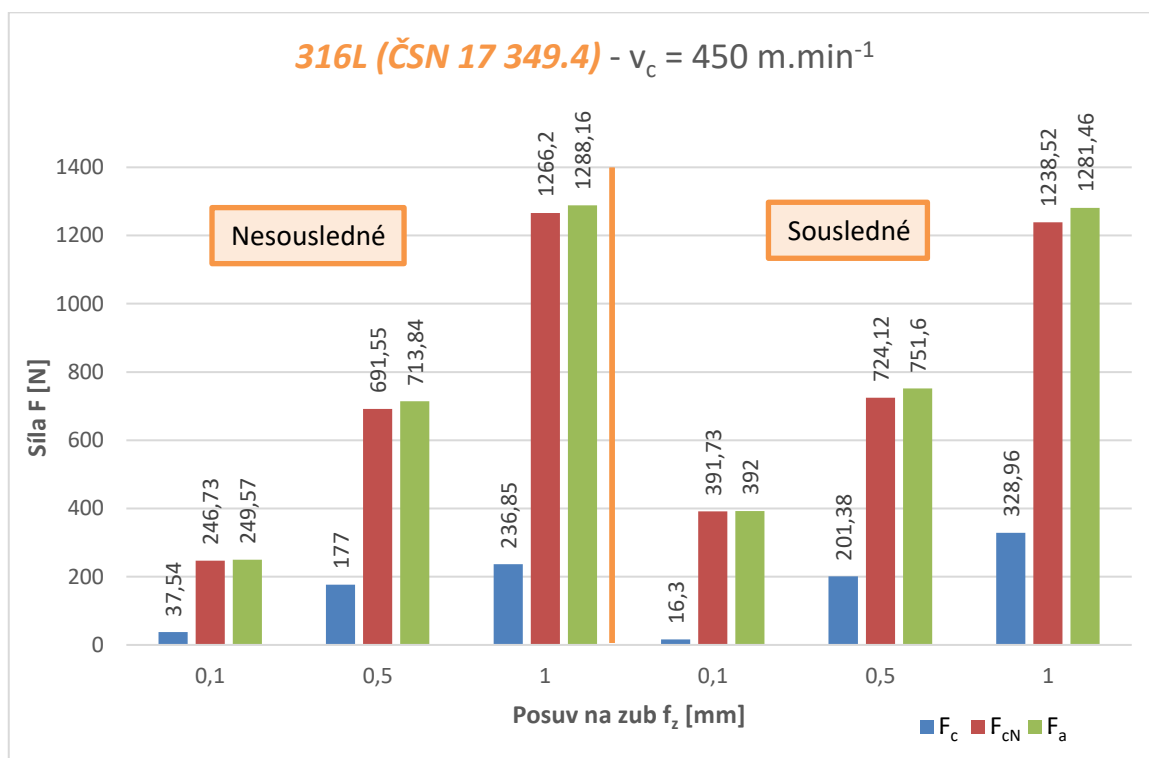
Následuje porovnání silových poměrů u sousledné a nesousledné strategii čelního frézování oceli 316L (ČSN 17 349.4), při stejných parametrech řezu.



Graf 8. Porovnání řezných sil F_c , F_{cN} a F_p u nesousledného a sousledného frézování oceli 17 349.4, při parametrech řezné rychlosti 250 m.min⁻¹ a posuvu na zub 0,1 mm, 0,5 mm a 1 mm.



Graf 9. Porovnání řezných sil F_c , F_{cN} a F_p u nesousledného a sousledného frézování oceli 17 349.4, při parametrech řezné rychlosti 350 m.min^{-1} a posuvu na zub 0,1 mm, 0,5 mm a 1 mm.



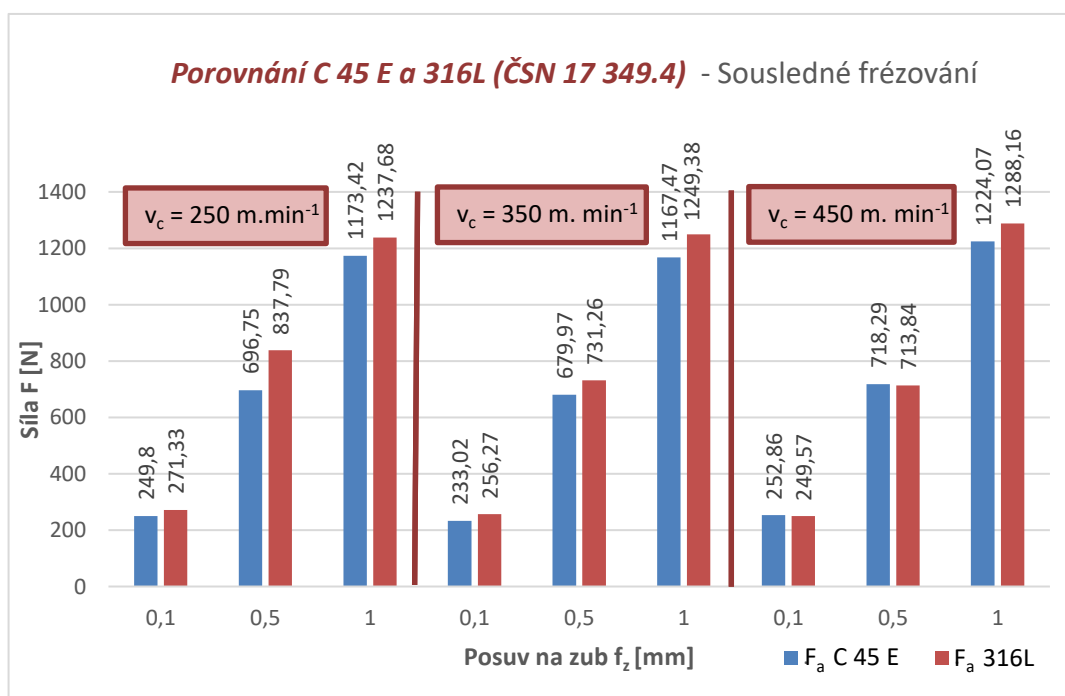
Graf 10. Porovnání řezných sil F_c , F_{cN} a F_p u nesousledného a sousledného frézování oceli 17 349.4, při parametrech řezné rychlosti 450 m.min^{-1} a posuvu na zub 0,1 mm, 0,5 mm a 1 mm.

4.3 Porovnání sil při frézování oceli 316L a C 45 E

Pro přehlednost byla vytvořena tabulka, ve které se nachází hodnoty s výslednicemi sil F_a pro oba druhy oceli. Tabulka 21 obsahuje výslednice sil F_a pro oceli C 45 E a 316L s nesouslednou strategií frézování. Následně je vytvořen graf, v němž jsou vyobrazeny jednotlivé hodnoty výsledných sil F_a .

Tab. 21 Porovnání výsledných sil F_a ocelí C 45 E a 316L při nesousledném frézování

Porovnání C 45 E (ČSN 12 050.9) a 316L (ČSN 17 349.4) - Nesousledné			
Parametry obrábění		Výslednice sil F_a	
		C 45 E	316L
v_c [m.min ⁻¹]	f_z [mm]	F_a [N]	F_a [N]
250	0,1	249,8	271,33
250	0,5	696,75	837,79
250	1	1173,42	1237,68
350	0,1	233,02	256,27
350	0,5	679,97	731,26
350	1	1167,47	1249,38
450	0,1	252,86	249,57
450	0,5	718,29	713,84
450	1	1224,07	1288,16



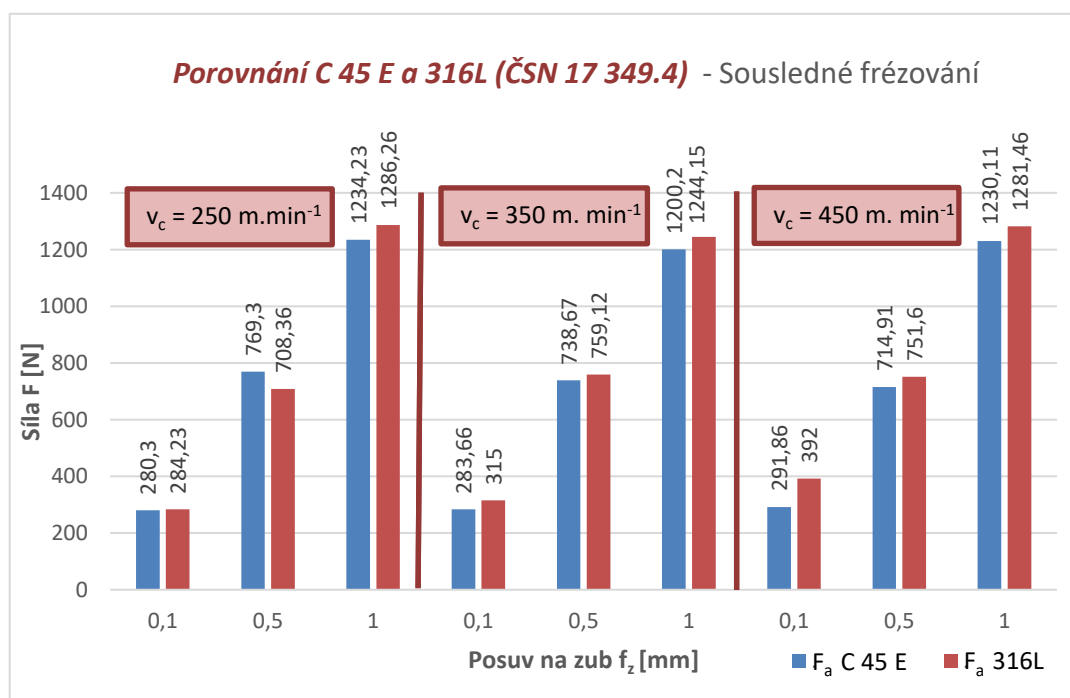
Graf 11. Porovnání výsledných sil F_a ocelí C 45 E a 316L při nesousledném frézování

Z tabulky i grafu porovnání výsledných sil F_a u ocelí C 45 E a 316L frézovaných nesouslednou strategií je možné usoudit, že dosahují ve většině případů u oceli 316L (17 349.1) vyšších hodnot. Pouze u parametrů řezné rychlosti $v_c = 450 \text{ m.min}^{-1}$ s posuvem na zub $f_z = 0,1$ a $0,5 \text{ mm}$ dochází k opačnému jevu a ocel C 45 E (ČSN 12 050.9) dosahuje vyšších hodnot výsledných sil F_a .

Tabulka 22 obsahuje výslednice sil F_a pro oceli C 45 E a 316L se souslednou strategií frézování. Následuje graf, v němž jsou vyobrazeny jednotlivé výsledné síly.

Tab. 22 Porovnání výsledných sil F_a ocelí C 45 E a 316L při sousledném frézování

Porovnání C 45 E (ČSN 12 050.9) a 316L (ČSN 17 349.4) - Sousledné			
Parametry obrábění		Výslednice sil F_a	
		C 45 E	316L
$v_c [\text{m.min}^{-1}]$	$f_z [\text{mm}]$	$F_a [\text{N}]$	$F_a [\text{N}]$
250	0,1	280,3	284,23
250	0,5	769,3	708,36
250	1	1234,23	1286,26
350	0,1	283,66	315
350	0,5	738,67	759,12
350	1	1200,2	1244,15
450	0,1	291,86	392
450	0,5	714,91	751,6
450	1	1230,11	1281,46

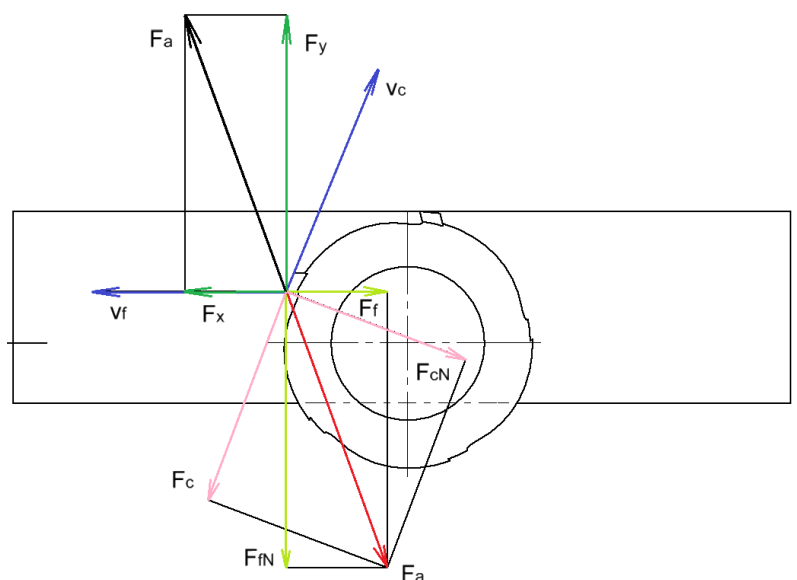


Graf 12. Porovnání výsledných sil F_a ocelí C 45 E a 316L při sousledném frézování

Z tabulky i grafu porovnání výsledných sil F_a u ocelí C 45 E a 316L frézovaných souslednou strategií je možné usoudit, že znovu dosahují ve většině případů u oceli 316L (17 349.1) vyšších hodnot. Pouze u parametrů řezné rychlosti $v_c = 250 \text{ m.min}^{-1}$ s posuvem na zub $f_z = 0,5 \text{ mm}$ dochází k opačnému jevu a ocel C 45 E (ČSN 12 050.9) dosahuje vyšších hodnot výsledných sil F_a . K této skutečnosti mohlo dojít z důvodu dobré kombinace zmiňovaných řezných parametrů řezné rychlosti v_c a posuvu na zub f_z u oceli 316L. Rovněž mohlo dojít ke zkreslení hodnot sil vlivem nepřesnosti měřicího zařízení, či zvýšených vibrací při frézování.

4.4 Vliv jednotlivých sil na stroj

Pro lepší orientaci doplňuji obrázek souhrnu všech sil působících při procesu frézování na břitu čelní frézy.



Obr. 34 Grafické znázornění silových poměrů pro lepší orientaci jejich vlivů na stroj

Výslednice sil F_a se rozkládá na další dvě složky – vodorovnou sílu F_f a svislou sílu F_{fN} . Nejdůležitější pro proces řezu je síla F_c , jež vykonává potřebnou práci k odběru třísky. Podle síly F_c je možné vypočítat efektivní výkon P_c .

- Osová síla F_o nebo F_p zatěžuje tlakem axiální ložisko vřetene frézovacího stroje, dále zařízení pro upnutí obrobku (svěrák), zařízení zajišťující příčný posuv a vedení stroje

- F_{cN} je radiální síla, která působí tlakem na ložisko vřetena a vytváří tak další třecí moment. Síla rovněž namáhá trn frézy na ohyb a je velmi důležitou součástí výpočtu složeného namáhání. Zmiňované složené namáhání je tvořené namáháním na krut (obvodová síla) a ohyb (radiální síla).
- Síla F_f je horizontální a zatěžuje posuvový mechanismus frézovacího zařízení. Podle této síly jsou dimenzovány uzly mechanismu posuvu, částí upínacího zařízení a různých potřebných přípravků potřebných pro obrábění.
- Síla F_{fN} je vertikální, zapříčiňuje namáhání konzoly frézovacího stroje na ohyb. F_x je síla boční a zvyšuje tření v podélném vedení stolu

Z hodnot naměřených a dopočtených sil je možné vyhodnotit, že k největšímu namáhání dochází působením složky síly F_{cN} , která působí tlakem na ložisko vřetena a vytváří tak další třecí moment při frézování. Druhou složkou síly, která rovněž vysoce namáhá části obráběcího stroje je síla $F_y = F_{fN}$ a ta zapříčiňuje namáhání konzoly frézovacího stroje na ohyb. Nízkých hodnot dosahuje složka síly F_c , která vykonává potřebnou práci k odběru třísky. Nižších hodnot rovněž dosahuje horizontální složka síly $F_x = F_f$ a zatěžuje posuvový mechanismus frézovacího zařízení.

Shrnutí výsledků

Tato kapitola bude obsahovat krátké shrnutí výsledků naměřených sil na obou vzorcích ocelí. Bude porovnána především sousledná a nesousledná strategie frézování u obou ocelí, kde budou rovněž popsány největší a nejmenší výsledné síly F_a u dané řezné rychlosti při posuvu na zub $f_z = 0,1 \text{ mm}$, $0,5 \text{ mm}$ a 1 mm .

Ocel C 45 E (ČSN 12 050.9)

Nesousledné frézování

- Při posuvu na zub $f_z = 0,1 \text{ mm}$ je výsledná složka síly nejnižší $F_a = 233,02 \text{ N}$ u řezné rychlosti $v_c = 350 \text{ m.min}^{-1}$ a nejvyšší $F_a = 252,86 \text{ N}$ u řezné rychlosti $v_c = 450 \text{ m.min}^{-1}$
- Při posuvu na zub $f_z = 0,5 \text{ mm}$ je výsledná složka síly nejnižší $F_a = 679,97 \text{ N}$ u řezné rychlosti $v_c = 350 \text{ m.min}^{-1}$ a nejvyšší $F_a = 718,29 \text{ N}$ u řezné rychlosti $v_c = 450 \text{ m.min}^{-1}$
- Při posuvu na zub $f_z = 1 \text{ mm}$ je výsledná složka síly nejnižší $F_a = 1167,47 \text{ N}$ u řezné rychlosti $v_c = 350 \text{ m.min}^{-1}$ a nejvyšší $F_a = 1224,07 \text{ N}$ u řezné rychlosti $v_c = 450 \text{ m.min}^{-1}$

Sousledné frézování

- Při posuvu na zub $f_z = 0,1 \text{ mm}$ je výsledná složka síly nejnižší $F_a = 280,3 \text{ N}$ u řezné rychlosti $v_c = 250 \text{ m.min}^{-1}$ a nejvyšší $F_a = 291,86 \text{ N}$ u řezné rychlosti $v_c = 450 \text{ m.min}^{-1}$
- Při posuvu na zub $f_z = 0,5 \text{ mm}$ je výsledná složka síly nejnižší $F_a = 714,91 \text{ N}$ u řezné rychlosti $v_c = 450 \text{ m.min}^{-1}$ a nejvyšší $F_a = 769,3 \text{ N}$ u řezné rychlosti $v_c = 250 \text{ m.min}^{-1}$
- Při posuvu na zub $f_z = 1 \text{ mm}$ je výsledná složka síly nejnižší $F_a = 1200,2 \text{ N}$ u řezné rychlosti $v_c = 350 \text{ m.min}^{-1}$ a nejvyšší $F_a = 1234,23 \text{ N}$ u řezné rychlosti $v_c = 250 \text{ m.min}^{-1}$

Při porovnání výsledných složek sil F_a u oceli C 45 E (ČSN 12 050.9) při sousledné a nesousledné strategii frézování, je možné jednoznačně říct, že ve všech případech jsou hodnoty těchto sil vyšší u sousledné strategie.

Ocel 316L (ČSN 17 349.4)

Nesousledné frézování

- Při posuvu na zub $f_z = 0,1 \text{ mm}$ je výsledná složka síly nejnižší $F_a = 249,57 \text{ N}$ u řezné rychlosti $v_c = 450 \text{ m.min}^{-1}$ a nejvyšší $F_a = 252,86 \text{ N}$ u řezné rychlosti $v_c = 250 \text{ m.min}^{-1}$

- Při posuvu na zub $f_z = 0,5 \text{ mm}$ je výsledná složka síly nejnižší $F_a = 713,84 \text{ N}$ u řezné rychlosti $v_c = 450 \text{ m.min}^{-1}$ a nejvyšší $F_a = 837,78 \text{ N}$ u řezné rychlosti $v_c = 250 \text{ m.min}^{-1}$
- Při posuvu na zub $f_z = 1 \text{ mm}$ je výsledná složka síly nejnižší $F_a = 1237,68 \text{ N}$ u řezné rychlosti $v_c = 250 \text{ m.min}^{-1}$ a nejvyšší $F_a = 1288,16 \text{ N}$ u řezné rychlosti $v_c = 450 \text{ m.min}^{-1}$

Sousledné frézování

- Při posuvu na zub $f_z = 0,1 \text{ mm}$ je výsledná složka síly nejnižší $F_a = 284,23 \text{ N}$ u řezné rychlosti $v_c = 250 \text{ m.min}^{-1}$ a nejvyšší $F_a = 392 \text{ N}$ u řezné rychlosti $v_c = 450 \text{ m.min}^{-1}$
- Při posuvu na zub $f_z = 0,5 \text{ mm}$ je výsledná složka síly nejnižší $F_a = 708,36 \text{ N}$ u řezné rychlosti $v_c = 250 \text{ m.min}^{-1}$ a nejvyšší $F_a = 759,12 \text{ N}$ u řezné rychlosti $v_c = 350 \text{ m.min}^{-1}$
- Při posuvu na zub $f_z = 1 \text{ mm}$ je výsledná složka síly nejnižší $F_a = 1244,15 \text{ N}$ u řezné rychlosti $v_c = 350 \text{ m.min}^{-1}$ a nejvyšší $F_a = 1286,26 \text{ N}$ u řezné rychlosti $v_c = 250 \text{ m.min}^{-1}$

Při porovnání výsledných složek sil F_a u oceli 316L (ČSN 17 349.4) při sousledné a nesousledné strategii frézování to tak jednoznačné není. Ve většině případů dosahují výsledné síly vyšších hodnot u sousledného frézování. Nachází se zde ale i případy, kde jsou výsledné síly vyšší u nesousledné strategie frézování např. při řezné rychlosti $v_c = 250 \text{ m.min}^{-1}$, 450 m.min^{-1} při posuvu na zub $f_z = 0,5 \text{ mm}$.

Závěr

V úvodu se diplomová práce zabývala teorií vysokorychlostního frézování, kde byla řešena historie, funkce, principy a použití tohoto druhu obrábění. Dále byly v práci popsány požadavky na stroj a nástroj při tomto způsobu obrábění.

V rešerši experimentální části práce byl uveden jeden z příkladů experimentu, který se podobá experimentu v mé práci. Toto obrábění je součástí diplomové práce a jeho náplní bylo čelní frézování vzorku oceli C 45 E (ČSN 12 050.9), který byl obráběn i v experimentu mě diplomové práce. Pro obrábění tohoto vzorku byla použita frézovací hlava o průměru 80 mm s jednou upnutou vyměnitelnou břitovou destičkou. Parametry obrábění byly: řezná rychlost $v_c = 226 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, posuv na zub $f_z = 0,89 \text{ mm}$ a hloubka řezu $a_p = 1 \text{ mm}$. Výsledná průměrná síla měla hodnotu 382 N. U mého testu by při podobných řezných parametrech byla síla okolo 900 N, což je více než dvakrát tolik. Tak vysoký rozdíl mezi zmiňovanými hodnotami se vysvětluje skutečností, že autor diplomové práce volil průměrné výsledné síly a v této práci byly použity maximální hodnoty sil v ustálené části naměřeného signálu.

V experimentální části diplomové práce byly popsány obráběné materiály, obráběcí stroj, frézovací hlava, VBD a soustava zařízení pro měření sil při obrábění. Dále je zde vysvětlen průběh sousledného a nesousledného obrábění u čelního frézování.

Samotné obrábění probíhalo na pětiosém frézovacím centru DMG MORI DMU 50. Nástrojem byla frézovací hlava s pěti vyměnitelnými břitovými destičkami. Ve frézovací hlavě byla upnuta pouze jedna VBD, aby nedocházelo k rušivým elementům a bylo jednodušší filtrovat a vyhodnocovat křivky jednotlivých sil.

Pro čelní frézování byly určeny dvě oceli C 45 E (ČSN 12 050.9) a 316L (ČSN 17 349.4). Pro frézování byly zvoleny tři řezné rychlosti $v_c = 250, 350 \text{ a } 450 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, tři posuvy na zub $f_z = 0,1 \text{ mm}, 0,5 \text{ mm a } 1 \text{ mm}$ a konstantní řezná hloubka $a_p = 0,5 \text{ mm}$. V průběhu obráběcího experimentu byly vzorky umístěny na desce dynamometru, aby bylo možné následně vyhodnotit silové poměry.

Maximální hodnoty sil F_x (F_f) a F_y (F_{fN}) byly vyhodnoceny za pomoci softwaru DynoWare a byla dopočtena výsledná síla F_a pomocí Pythagorovy věty. Následovalo dopočítání složek sil F_c a F_{cN} maticovým propočtem. Naměřené a dopočtené složky síly byly přehledně zapsány do tabulek, ze kterých byly následně vytvořeny grafy. Pomocí grafů byly mezi sebou porovnány hodnoty sil u použitých řezných rychlostí $v_c = 250, 350 \text{ a } 450 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ mezi posuvy na zub $f_z = 0,1 \text{ mm}, 0,5 \text{ mm a } 1 \text{ mm}$ při sousledném i nesousledném frézování. Dále byly u obou ocelí porovnány hodnoty silových poměrů při stejných řezných

parametrech, ale odlišné strategii frézování (nesousledné a sousledné). Poslední porovnání se týkalo hodnot výsledných sil F_a mezi oběma materiály.

V závěru práce byly popsány vlivy jednotlivých složek sil na namáhání částí obráběcího stroje. Lze konstatovat, že k největšímu namáhání dochází působením složky síly F_{cN} , která působí tlakem na ložisko vřetena a vytváří tak při frézování další třecí moment. Druhou složkou síly, která dosahuje vyšších hodnot, je $F_y = F_{fN}$, a zapříčiňuje zvýšené namáhání konzoly frézovacího stroje na ohyb. Nízkých hodnot dosahuje složka řezné síly F_c , která vykonává potřebnou práci pro odběr třísky. Hodnota horizontální síly $F_x = F_f$ dosahuje také nižších hodnot a méně namáhá posuvový mechanismus frézovacího zařízení.

Literatura

- [1] Vysokorychlostní obrábění: klíč k vyšší produktivitě [online]. Praha, 2010 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vysokorychlostni-obrabeni-klic-k-vyssi-produktivite.html>
- [2] AN INTRODUCTION TO CNC MACHINE CONTROL: A BRIEF HISTORY OF CNC [online]. USA: HACKADAY, 2015 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://hackaday.com/2016/11/11/an-introduction-to-cnc-machine-control/>
- [3] BRYCHTA, Josef, Marek SADÍLEK, Robert ČEP a Jana PETRŮ. *Progresivní metody v obrábění: Aspekty a efekty vysokorychlostní technologie* [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/019/dokumenty/Progresivni_metody_v_obrabeni_FINAL.pdf. Studijní opora. VŠB - Technická univerzita Ostrava.
- [4] PETRŮ, Jana. HODNOCENÍ VYBRANÝCH PARAMETRŮ INTEGRITY POVRCHU PO OBRÁBĚNÍ VYSOKÝMI RYCHLOSTMI: Postata HSM obrábění. Ostrava, 2015. Habilitační práce. VŠB-Technická univerzita Ostrava.
- [5] Důležité aspekty vysokorychlostního obrábění: Hlavní přednosti HSC [online]. Praha: MM Průmyslové spektrum, 2002 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/dulezite-aspekty-vysokorychlostniho-obrabeni.htm>
- [6] NOVÁČEK, Pavel. Vliv posuvové rychlosti na povrchová napětí při frézování kalených ocelí: Obrábění tvrdých materiálů. Ostrava, 2016. Disertační práce. VŠB-Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.
- [7] Obrábění kalených materiálů řeznou keramikou: Technologie vysokorychlostního obrábění – HSC [online]. Praha: MM Průmyslové spektrum, 2008 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/obrabeni-kalenych-materialu-reznou-keramikou.html>
- [8] ZELENÝ, Jaromír: Vysokorychlostní obrábění aneb obráběcí stroje a technologie na přelomu století, MM průmyslové spektrum – speciál, červen 2000, 114 s., ISBN 80-85986-19-1

- [9] Frézování litin: Sandvik Coromant třídy CC6190 [online]. Švédsko: SANDVIK Coromant, 2010 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/getting_started/milling_different_materials/cast_iron_milling/pages/default.aspx
- [10] Nové frézy Seco s keramickými břitovými destičkami: Vysokorychlostní obrábění vysoce legovaných slitin na bázi niklu [online]. Praha: MM Průmyslové spektrum, 2017 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://www.cnckonstrukce.cz/novinka-121/nove-frezy-seco-s-keramickymi-britovymi-destickami-pro-vysokorychlostni-obrabeni-vysoce-legovanych-slitin-na-bazi-niklu.html>
- [11] VAŠÍČEK, Jiří. Silové zatížení řezných nástrojů při frézování: Experiment. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v brně. Vedoucí práce ING. ALEŠ POLZER, Ph.D.
- [12] 1.4404: Ušlechtilá legovaná ocel [online]. Studénka: AK, 2008 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://www.ak1324.cz/1-4404-jakost-nerezove-oceli/>
- [13] 1.4404: MATERIAL [online]. Deutschland: M. WOITE, 2005 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://www.m-woite.de/en/materials/14404.shtml>
- [14] C 45 E: Přehled vlastností oceli [online]. Česká republika, 2005 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: http://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10083/MOP_vlastnosti_C45.pdf
- [15] ZJP STEEL CENTRUM: Konstrukční, ušlechtilé a nerezové oceli [online]. ČESKÁ REPUBLIKA: ZJP, 2009 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://www.zjp.cz/konstrukcni-oceli/c1342>
- [16] DMU 50: Sparton masters complex parts with 5-axis technology [online]. USA: DMG MORI, 2015 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: http://www.dmgmori.com/webspecial/journal_2015_1/en-US/tn-dmu-50.htm
- [17] DMU 50: Universal milling with up to five axes for everyone [online]. USA: DMG MORI, 2010 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/products/milling-machines/universal-milling-machines-for-5-sided-5-axis-machining/dmu/dmu-50-2nd-generation#Intro>

- [18] Frézovací hlava 419-052Q22-14H: Parametry frézovací hlavy [online]. Švédsko: SANDVIK Coromant, 2010 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/Pages/productdetails.aspx?c=419-052q22-14h>
- [18] Vyměnitelná břitová destička 419R-1405E-MM 1030: Parametry VBD [online]. Švédsko: SANDVIK Coromant, 2009 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/Pages/productdetails.aspx?c=419r-1405e-mm%201030>
- [19] Příručka pro technology: Kompenzační přístup při frézování - poloha frézy [online]. Praha: MM Průmyslové spektrum, 2013 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-kompenzacni-pristup-pri-frezovani-poloha-frezy.html>
- [20] Multicomponent Dynamometer: KISTLER type 9129 AA [online]. Switzerland: KISTLER Group, 2009 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/?type=669&fid=75231&model=document>
- [21] Multichannel Charge Amplifier: KISTLER type 5070A [online]. Switzerland: KISTLER Group, 2010 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/?type=669&fid=66807&model=document>
- [22] DAQ-System for DynoWare: KISTLER Type 5697A [online]. Switzerland: KISTLER Group, 2010 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/?type=669&fid=74579&model=document>
- [23] Instruction Manual: Multicomponent Dynamometer Type 9129AA [online]. Switzerland: KISTLER Group, 2011 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/?type=669&fid=75236&model=document>
- [24] ZKLADNÍ VZORCE PRO FRÉZOVÁNÍ: Vzorci [online]. Česká republika: TaeguTec, 2005 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: http://www.taegutec.cz/innotool/prirucka_obrazeni_2114.pdf
- [25] Facemilling: Velocity components [online]. Switzerland: KISTLER Group, 2012 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.kistler.com>

- [26] VAŠÍČEK, Jiří. SILOVÉ ZATÍŽENÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ PŘI FRÉZOVÁNÍ: VÝPOČET. Brno, 2014. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce ING. ALEŠ POLZER, Ph.D.
- [27] AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. Příručka obrábění - Kniha pro praxe. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting – A Practical Handbook. ISBN 91-972299-4-6.
- [28] POPELKA, Aleš. *Dynamická obrobiteľnosť kovů a plastů přibroušení a frézování: Vliv jednotlivých sil u frézování*. Zlín, 2008. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Doc. Ing. Imrich Lukovics, CSc.